



UNIVERSIDADE FEDERAL DE PERNAMBUCO
CENTRO DE TECNOLOGIA E GEOCIÊNCIAS
DEPARTAMENTO DE OCEANOGRAFIA
PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM OCEANOGRAFIA

O campo magnético natural terrestre como parâmetro
da movimentação oceânica de tartarugas marinhas

Guilherme Pereira da Silva

Recife - PE
2013

Guilherme Pereira da Silva

**O campo magnético natural terrestre como parâmetro
da movimentação oceânica de tartarugas marinhas**

Tese apresentada ao Programa de Pós-Graduação em Oceanografia (PPGO) da Universidade Federal de Pernambuco, como requisito parcial à obtenção do grau de Doutor em Ciências, área de Oceanografia Geológica.

Orientadora: Dr^a.Tereza Cristina Medeiros de Araújo

Co-orientador: Dr. Paulo de Barros Correia

**Recife - PE
2013**

Catálogo na fonte
Bibliotecária Margareth Malta, CRB-4 / 1198

S586c	<p>Silva, Guilherme Pereira da.</p> <p>O campo magnético natural terrestre como parâmetro da movimentação oceânica de tartarugas marinhas / Guilherme Pereira da Silva. - Recife: O Autor, 2013.</p> <p>xvi, 152 folhas, il., gráfs., tabs.</p> <p>Orientadora: Profa. Dra. Tereza Cristina Medeiros de Araújo. Co-orientador: Prof. Dr. Paulo de Barros Correia. Tese (Doutorado) – Universidade Federal de Pernambuco. CTG. Programa de Pós-Graduação em Oceanografia, 2013. Inclui Referências e Apêndice.</p> <p>1. Oceanografia. 2. Geomagnetismo. 3. Tartarugas Marinhas. 4. Navegação. I. Araújo, Tereza Cristina Medeiros de. (Orientadora). II. Correia, Paulo, de Barros. (Co-orientador). III. Título.</p> <p style="text-align: center;">UFPE</p> <p>551.46 CDD (22. ed.) BCTG/2013-318</p>
-------	--

Guilherme Pereira da Silva

**O campo magnético natural terrestre como parâmetro
da movimentação oceânica de tartarugas marinhas**

Tese submetida ao curso de Pós-Graduação em Oceanografia da Universidade Federal de Pernambuco, como requisito parcial para obtenção do grau de Doutor.

Banca Examinadora

Recife, 25 de Outubro de 2013.

Dr^a. Tereza Cristina Medeiros de Araújo – UFPE (Orientadora)

Prof. Dr. Mário Barletta - UFPE

Prof. Dr. Roberto Lima Barcellos - UFPE

Dr. Daniel Acosta Avalos – CBPF – MCT - RJ

Dr^a. Maria Danise de Oliveira Alves - UFPE

Suplentes

Prof^a. Dr^a. Carmen Medeiros Limongi - UFPE

Dr. Fernando de Figueiredo Porto Neto - UFRPE

AGRADECIMENTOS

Aos meus amados pais

Nith Moreira da Silva e Washington Pereira da Silva (*in Memoriam*)

Aos meus filhos

Victor Marcelo, Gabriela Beatriz e Isis Bethânia

e a minha querida esposa

Cristine Espíndola

Pelo incentivo, amor e compreensão.

Aos que colaboraram

Representantes do Curso de Pós-Graduação em Oceanografia e ao Departamento de Oceanografia pelo suporte oferecido, especialmente à Myrna Lins por sua dedicação.

Aos integrantes do LABOGEO (Laboratório de Oceanografia Geológica do DOCEAN-UFPE) pelo apoio e estímulo à pesquisa científica.

À minha orientadora Dr^a. Tereza Cristina Medeiros de Araújo pela confiança e apoio durante todo o percurso.

Ao meu co-orientador Dr. Paulo de Barros Correia pelo suporte técnico e confiança repassadas, na busca por novas formas de visualização da pesquisa no contexto científico e também social.

Aos meu colegas do Instituto Federal de Educação, Ciência e Tecnologia de Pernambuco (IFPE) pelo estímulo à inovação e ao aprendizado constante.

Ao Prof. Alaor Simch de Campos (Capitão de Marinha do Brasil – Escola Naval – RJ) pelo estímulo ao estudo da Ciência em minha formação básica.

“O estudo, a busca da verdade e da beleza são domínios em que nos é consentido sermos crianças por toda a vida”

Albert Einstein

SUMÁRIO

	Pág.
SUMÁRIO	i
RESUMO	ii
ABSTRACT	iii
LISTA DE FIGURAS	iv
LISTA DE TABELAS	xv
APRESENTAÇÃO	
Introdução	2
Objetivo Geral	4
Objetivos Específicos	4
Estrutura da tese	5
CAPÍTULO 1	
O campo magnético terrestre	8
1.1 Histórico	9
1.2 Grandezas e unidades físicas utilizadas no magnetismo	12
1.3 As origens do campo geomagnético	14
1.4 A magnetosfera e o ambiente terrestre	16
1.5 O modelo geofísico atual	18
1.6 Variabilidade temporal e espacial do campo geomagnético	21
1.7 As componentes do campo magnético terrestre	24
CAPÍTULO 2	
As tartarugas marinhas e o magnetismo terrestre	27
2.1 Introdução	28
2.2 Acompanhamento de tartarugas marinhas em movimentos oceânicos	29
2.3 A magnetopercepção em tartarugas marinhas	31
2.4 Monitoramento de tartarugas marinhas por telemetria	35

CAPÍTULO 3

Métodos	39
3.1 Modelos geomagnéticos mundiais	40
3.2 Softwares utilizados no tratatamento de dados geomagnéticos	45
3.3 Mapas com movimentação oceânica de tartarugas marinhas	46
3.4 Determinação da intensidade do campo geomagnético oceânico	47
3.5 Desenvolvimento metodológico da pesquisa	50

CAPÍTULO 4

Green turtles and the crust's magnetic field	53
Summary	54
Introduction	55
Material and Methods	57
Results	59
Discussions	67
References	71

CAPÍTULO 5

O campo de anomalias magnéticas terrestres como parâmetro em movimentos oceânicos de tartarugas-verdes (<i>Chelonia mydas</i>)	74
Resumo e Abstract	75
Introdução	76
Material e métodos	78
Resultados e discussão	80
Referências	86

CAPÍTULO 6

The magnetic field of the oceanic crust as a parameter to the movements of green turtles (<i>Chelonia mydas</i>) in the region of the Galápagos Archipelago (Ecuador)	89
Abstract	90
Introduction	91
Material and Methods	94
Results and Discussion	96
References	104

CAPÍTULO 7

O campo magnético da crosta terrestre e seu relacionamento com movimentos oceânicos de tartarugas-de-couro (<i>Dermochelys coriacea</i>) no Oceano Atlântico Sul	107
Resumo e Abstract	108
Introdução	109
Material e Métodos	111
Resultados e Discussão	114
Referências	124

CONSIDERAÇÕES FINAIS

Conclusões	128
Recomendações Finais	130

REFERÊNCIAS	131
--------------------	-----

APÊNDICE

Green Turtles and the Crust's Magnetic Field (artigo em formato original)	139
---	-----

RESUMO

Silva, G.P. (2013). **O campo magnético natural terrestre como parâmetro da movimentação oceânica de tartarugas marinhas.** Tese (Doutorado). Departamento de Oceanografia, Centro de Tecnologia e Geociências, Universidade Federal de Pernambuco, Recife, Brasil, 152pp.

Neste estudo relaciona-se o campo magnético natural terrestre, a movimentos oceânicos de tartarugas marinhas. Utilizou-se mapas e dados de posição geográfica, referentes a rotas oceânicas de tartarugas-verdes (*Chelonia mydas*) e tartarugas-de-couro (*Dermochelys coriacea*), publicados em periódicos especializados. Construiu-se tabelas, contendo dados relativos ao campo geomagnético, em softwares dos modelos globais WMM2010 e EMM2010. Além de comparativos, com gráficos e tabelas numéricas, entre as posições ocupadas por animais e a intensidade do campo magnético total (F), da contribuição dada pela crosta. Inicialmente, foi identificada a presença de múltiplas anomalias magnéticas (variações irregulares do campo), próximas às posições ocupadas pelas tartarugas marinhas. Localizadas as posições geográficas e intensidades destas anomalias, constatou-se que as tartarugas-verdes deslocaram-se no sentido de evitarem estas regiões. O estudo aplicou a metodologia, à trilhas oceânicas de onze regiões distintas, verificando ser este comportamento comum a todas elas. Um estudo matemático específico, relativo às intensidades de anomalias magnéticas, nas proximidades das Ilhas de Ascensão (no Oceano Atlântico) e da Ilha Europa (Canal de Moçambique), mostrou que, além de desviarem de anomalias, os animais navegaram por uma faixa cuja intensidade oscilou entre - 50 e +50 nanoTesla (nT). Isto sugere haver uma “faixa de conforto geomagnético”, relativo à contribuição gerada pela crosta terrestre, na qual os animais buscam se posicionar. Cinco tartarugas-verdes na Ilha de Ascensão estiveram em regiões a 85% desta faixa, e três animais na Ilha Europa, a 81%. Assim, na maior parte das posições ocupadas pelos animais, o campo de anomalias variou entre - 50 e +50 nT. Foram realizados mais dois estudos comparativos, utilizando o campo magnético da crosta, porém considerando-se as componentes Norte-Sul, Leste-Oeste e Vertical, do campo total. Um primeiro estudo, comparou posições geográficas de sete tartarugas-verdes, que depositaram ovos em Galápagos e migravam para o continente, com a intensidade do campo total da crosta oceânica. Neste caso, os animais também mantiveram o mesmo comportamento, evitando regiões de maior variabilidade geomagnética. Ao analisar-se a região do entorno de cada posição ocupada, verificou-se que os animais optaram por ocupar posições com intensidade relativa próxima à média local. Uma projeção georreferenciada, de regiões do entorno (limites meio por meio grau), mostrou que os animais estavam, na maior parte das vezes, mais próximos das intensidades médias do que das máximas e mínimas. Numericamente, a diferença entre as médias locais e as intensidades nas posições dos animais variou entre 1,4 e 8,5%. A diferença relativa de intensidade para máximos e mínimos locais estão, em média, entre 44,3 e 55,7%, indicando que os animais optaram por posições intermediárias. Um último estudo, repetiu a metodologia para duas tartarugas-de-couro, um macho e uma fêmea, que navegaram no Oceano Atlântico Sul, próximo à costa brasileira. Além de percorrem rotas que evitavam regiões com maior variabilidade do campo da crosta oceânica, estes animais mantiveram-se em posições cujas intensidades eram relativamente medianas ao entorno. Durante o trajeto, os animais posicionaram-se em locais onde a intensidade é mais próxima das médias locais, do que das máximas e mínimas. O espécime fêmea esteve em pontos que diferiam de intensidade, em média, em 1,75% do valor médio local de campo; enquanto o espécime macho em 0,42%. Assim, através de avaliações realizadas por regiões oceânicas distintas, espécies diferentes e épocas diversas, pode-se apontar a intensidade do campo magnético gerado pela crosta terrestre como um parâmetro componente da orientação e navegabilidade de tartarugas marinhas em mar aberto.

Palavras-chave: Oceanografia. Geomagnetismo. Tartarugas Marinhas. Navegação.

ABSTRACT

Silva, G. P. (2013). The Earth's magnetic field as a parameter of the Sea Turtles oceanic movements. Thesis (Ph.D.). Department of Oceanography, Earth Sciences and Technology Center, Federal University of Pernambuco, Recife, Brazil, 152pp.

A study was conducted, linking the natural magnetic field terrestrial to oceanic movements of marine turtles. Maps and geographic position data, regarding to ocean routes of green turtles (*Chelonia mydas*) and leatherback turtles (*Dermochelys coriacea*), published in specialized journals, were used. Also tables containing data were used, relating to the geomagnetic field, built with the softwares of global models WMM2010 and EMM2010. Comparative through graphs and numerical tables were made, between the positions occupied by animals and the contribution made by the crust of total magnetic field (F). Initially, were identified the presence of multiple magnetic anomalies (irregular variations of the field), close to the positions occupied by marine turtles. Localized the geographical positions and intensities of these anomalies, it was found that green turtles moved to refrain from these regions. The study applied the methodology to track eleven distinct ocean regions, verifying that this behavior is common to all of them. A mathematical specific study, concerning to intensities of magnetic anomalies nearby islands of Ascension (Atlantic Ocean) and Europa Island (Mozambique Channel), showed that, in addition to deviate anomalies, the animals navigated by a band whose intensity ranged between -50 and +50 nanoTesla (nT). This suggests, there is a "comfort geomagnetic band", on the contribution generated by the earth's crust, in which animals seek to position themselves. Five turtles at Ascension Island, were in these regions 85% of this band, and three animals in Europe, 81%. Thus, at most of the positions occupied by these animals, the field anomalies ranged between +50 and -50 nT. Were conducted two new comparative studies, using the magnetic field of the crust, however considering the components North-South, East-West and Vertical, of the total field. At first study, were compared seven geographic locations green turtles, that laid eggs in Galapagos and migrated to the mainland, with the intensity of the total field of the oceanic crust. In this case, animals also showed the same behavior, avoiding geomagnetic regions of higher variability. When analyzing the region surrounding each position occupied, it was observed that the animals chosen to occupy positions whose intensity, are close to the average local intensity. A georeferenced projection on surrounding regions (limits by half degree), showed that the animals were, in most cases, closer of the average intensities than maxima and minima. Numerically, the difference between the average local intensities and the positions of the animals ranged between 1.4 and 8.5%. The relative difference into intensity for local maxima and minima are on average between 44.3 and 55.7%, indicating that the animals have chosen intermediate positions. A latest study, repeated the methodology for two leatherback turtles, one male and one female, who sailed on the South Atlantic Ocean, near the Brazilian coast. Besides the travel routes that avoided regions with higher variability of the field of oceanic crust, these animals remained in positions whose intensities were relatively medians to the surroundings. Along the way, the animals were positioned in locations where the intensity is closer to the local average, than the maximum and minimum. The female specimen was at points that differed in intensity, on average, 1.75% to the local field average, while the male specimen 0.42%. Thus, through assessments by different oceanic regions, different species and different times, we could suggest the intensity of the magnetic field generated by the Earth's crust, as a parameter comprising the orientation and navigation of sea turtles in the open ocean.

Key-Words: Oceanography. Geomagnetism. Marine Turtles. Navigation

LISTA DE FIGURAS

Capítulo 1: O campo magnético terrestre

	Pag.
Figura 1. Bússola portuguesa de navegação do século XV. Cópia do Instituto Smithsonian do original no “Museum of the History of Science”, Cambridge University. Fonte: Multhauf (1987).	009
Figura 2. Página central da edição de 1620 do livro “De Magnete” de William Gilbert. Inaugurando a pesquisa moderna do geomagnetismo. Fonte: Stern (2002).	010
Figura 3. Linhas de campo magnético idealizadas por Faraday, mostrando a bipolaridade do campo e o sentido de distribuição do campo. Fonte: Halliday <i>et al.</i> (2004).	011
Figura 4. O interior do planeta. As três principais camadas da Terra (CROSTA, MANTO e NÚCLEO) possuem subdivisões com características próprias. Fonte: Keary e Vine (1990).	015
Figura 5. Estrutura da magnetosfera. Na interação entre o campo magnético terrestre e o ambiente espacial, diversas regiões são criadas, formando o que chamamos de “clima espacial”. Fonte: Teixeira <i>et al.</i> (2009).	016
Figura 6. A magnetosfera enquadrada no ambiente atmosférico da Terra. Sua influência estende-se entre cerca de 100 km e pode atingir até 100 mil km de altitude. Adaptado de Seeber (2003).	016
Figura 7. Principais efeitos ligados ao campo magnético terrestre sobre atividades humanas. Adaptado de Space Weather (2012).	017
Figura 8. A magnetosfera da Terra e os efeitos do vento solar. Mesmo com o Sol a 150 milhões de km de distância, a magnetosfera é comprimida pela ondas de choque do vento solar. A área cinza chama-se cinturão de Van Allen (com até 25 mil km) formado por partículas do vento solar que interagem com a atmosfera e alinham-se de acordo com o campo magnético terrestre. Adaptado de Campbell, 2003.	018
Figura 9. Movimentos do núcleo da Terra produzem o campo magnético principal bipolar, capaz de influir sobre as condições ambientais de nosso planeta. Fonte: Teixeira <i>et al.</i> (2009) e Glatzmaier e Roberts (1995).	020
Figura 10. Acompanhamento “on line” de tempestades geomagnéticas pela NOAA - Space Weather. As variações na intensidade e direção do campo podem ser visualizadas a cada 15 minutos por satélites em órbita. Fonte: NOAA-Space Weather (2013).	021
Figura 11. Deriva global do campo geomagnético para oeste. Observa-se que a declinação de referência (zero) move-se para o oeste entre os períodos 1600 (A), 1800 (B) e 1990 (C), fruto da análise de registros históricos. Fonte: Jackson <i>et al.</i> (2000).	022

Figura 12. Variação da posição do polo magnético Norte em torno do polo geográfico Norte, entre o período de 69 mil e 45,5 mil anos atrás. Fonte: Teixeira *et al.* (2009). 023

Figura 13. Inversões do campo magnético principal terrestre ao longo das diversas eras geológicas. As faixas escuras representam polaridade igual a atual, enquanto faixas claras representam polaridade invertida. A escala da direita mostra as variações nos últimos 80 milhões de anos, enquanto a da esquerda mostra a variabilidade nos últimos 4,5 milhões. Fonte: Teixeira *et al.* (2009). 023

Figura 14. Representação dos elementos matemáticos do campo magnético terrestre. Os elementos lineares: componente Norte-Sul (X), Leste-Oeste (Y), Vertical (Z), Horizontal (H) e Campo Total (F). Elementos angulares: Inclinação magnética (I) e Declinação magnética (D). Fonte: Miranda (2004). 024

Capítulo 2: As tartarugas marinhas e o magnetismo terrestre

Figura 1. Tartaruga marinha com transmissores via satélite. O acompanhamento destes animais é utilizado no monitoramento de hábitos alimentares, rotas migratórias e distribuição geográfica. Fonte: Lohmann *et al.* (2008). 028

Figura 2. Tartaruga-de-couro (*Dermochelys coriacea*) recebendo marcação (tagging) durante postura, para registro e acompanhamento por telemetria via satélite. Foto: Turtugaruba Foundation – Aruba (2006). 029

Figura 3. Etiquetas de metal (Flipper taggs) utilizadas na marcação e colocação de transmissores de telemetria por microondas em tartaruga verde (*Chelonia mydas*) juvenil. Fonte: Eckert e Beggs (2006) e Mansfield *et al.* (2012). 029

Figura 4. Aplicação de marcação com etiquetas em tartarugas marinhas. As nadadeiras são escolhidas como ponto de aplicação. Foto: NMFS/SEFSC (2008). 030

Figura 5. Aplicação de marcações por ondas eletromagnéticas em tartarugas marinhas. Utilizando microndas (A) e por sinal de satélite (B) com envoltura protetora. Foto: NMFS/SEFSC (2008). 030

Figura 6. Possíveis formas de uso do campo magnético por animais. Orientação pelo polo magnético terrestre e não o geográfico (A) ou pela possível incorporação de cristais de magnetita às estruturas biológicas (B), através da formação de cristais superparamagnéticos (esferas azuis). Estas hipóteses são respaldadas por alterações de comportamento de certas espécies de tartarugas marinhas. Fonte: Lohmann (2010). 031

Figura 7. Tartaruga verde (*Chelonia mydas*) alimentando-se. Muitas espécies estão ameaçadas por alterações ambientais, tais como poluição das águas, impactos sonoros provocados por navios e elevação da temperatura dos oceanos. A percepção magnética pode ser um fator de registro dos impactos ambientais eletromagnéticos antrópicos. Fonte: NOAA (2012). 032

- Figura 8. Experimento de Lohmann (2008), realizado em 2001. Jovens tartarugas-cabeçadas (*Caretta caretta*) foram sujeitas a campos magnéticos semelhantes aos campos geomagnéticos de três pontos diferentes do Oceano Atlântico. Elas orientaram-se conforme a direção e o sentido da corrente marinha do Golfo, que as impulsiona na movimentação oceânica. Isto indica a possibilidade da existência de marcadores naturais nestes animais. Fonte: Lohmann *et al.* (2008). 033
- Figura 9. Movimentação de tartarugas-de-couro (*Dermochelys coriacea*) na costa africana. Correntes de deriva atrapalham a movimentação oceânica destes animais. Porém mecanismos ligados à direção das correntes, temperatura e magnetopercepção, podem estar colaborando conjuntamente na orientação animal. Fonte: Sale e Luschi (2009). 033
- Figura 10. Movimento de tartarugas-verdes (*Chelonia mydas*) nas proximidades da Ilha de Ascensão, no Oceano Atlântico. Indicativos mostram que informações químicas transportadas pelo vento, podem servir de pistas para o animal encontrar o local de nidificação, porém somente nas proximidades da Ilha. O campo magnético principal terrestre não sofre alterações substanciais que sirvam de indicativo. Fonte: Akensson *et al* (2003). 034
- Figura 11. Experimento realizado com tartarugas juvenis das espécies cabeçada e verdes. Os animais tiveram orientação (em laboratório) diferente quando retiradas as pistas visuais e magnéticas. Fonte: Avens (2003). 034
- Figura 12. Tartaruga marinha com marcadores (tagging) no casco pelo sistema ARGOS. Os transmissores são afixados nos animais e os sinais acompanhados via satélite. Fonte: Argos System (2012). 035
- Figura 13. Posicionamento de imãs em carapaças de tartarugas-verdes que retornavam de postura da Ilha de Ascensão no Atlântico Sul. As intensidades dos imãs não interferiram nas rotas. Fonte: Papi *et al.* (2000). 035
- Figura 14. Tartarugas-verdes retornando da desova no Arquipélago de Galápagos (Equador). Apesar de existirem grupos de animais formando um tipo de corredor, eles não dependem diretamente de variáveis usuais oceanográficas, tais como temperatura, correntes, altura de onda e níveis de clorofila. Fonte: Seminoff (2008). 036
- Figura 15. Trajeto migratório de um espécime de tartaruga verde deixando Poilão, na Guiné Bissau, até o Parque Nacional do Banc d'Arguin na Mauritânia. Dados como estes limitam as regiões de proteção à espécie. Fonte: Godley *et al.* (2003). 036
- Figura 16. Registro do corredor de migração de tartarugas-verdes no estreito de Taiwan. Mesmo com velocidades alteradas no percurso, devido à fortes correntes, os espécimes conseguiram completar o percurso com muita precisão. Fonte: Cheng (2009). 037
- Figura 17. Isolinhas do campo geomagnético principal. A intensidade do campo total em azul (em nT) e a inclinação magnética em vermelho (expressa em graus), em projeção Mercator. Fonte: Boström *et al.* (2012). 037

Capítulo 3: Métodos

Figura 1. Distribuição mundial dos sete elementos magnéticos do Campo Principal pelo modelo WMM2010. Os elementos escalares estão dispostos em contornos de 1000 nT e os angulares em contornos de 2 graus, todos em projeção Mercator. Intensidade Norte (X), Intensidade Leste (Y), Intensidade Vertical (Z), Intensidade Horizontal (H), Inclinação Magnética (I), Declinação Magnética (D) e Intensidade Total (F). Fonte: WMM (2010). 042

Figura 2. Imagem de tela inicial dos softwares wmm_point (A) e wmm_grid (B) em processamento. Os dados introduzidos de posição geográfica, altitude e data, geram a intensidade dos sete elementos do campo principal geomagnético pelo modelo WMM2010. Fonte: WMM (2010). 043

Figura 3. Imagem de tela inicial dos softwares emm_sph_point_windows (A) e emm_sph_grid_windows (B) em processamento. Os dados de posição geográfica, altitude e ano, identificam a intensidade dos sete elementos do campo geomagnético ampliado pelo modelo EMM2010. Fonte: EMM (2010). 044

Figura 4. Software SURFER11 em processamento de mapas da distribuição do campo magnético referente à uma região oceânica delimitada. As ferramentas de processamento por imagens são capazes de identificar as regiões de maior e menor variabilidade do campo. Fonte: Golden Software (2012). 045

Figura 5. Software VOXLER3 em processamento de mapas da distribuição do campo magnético terrestre em projeção 3D interativa. Fonte: Golden Software (2012). 045

Figura 6. Movimentos de tartarugas-verdes saindo da Ilha de Ascensão para as praias do Brasil. Estes registros mostram a distribuição georreferenciada de seis animais migrantes. Fonte: Luschi *et al.* (1998). 046

Figura 7. Movimentos oceânicos de tartarugas-verdes das Ilhas Galápagos para o continente (A) e nas proximidades da Ilha Europa (África) com uso de telemetria via satélite. Fonte: Seminoff *et al.* (2008) e Girard *et al.* (2006). 046

Figura 8. Representação da construção do campo de anomalias geomagnéticas. Em (A) temos a distribuição do campo total (F) relativa ao campo ampliado (campo principal acrescido das contribuições da crosta terrestre), em (B) a distribuição do campo principal e em (C) o campo de anomalias resultantes da subtração de (A) por (B). As áreas possuem sempre os mesmos limites geográficos e são projeções Mercator construídas no software SURFER11. 047

Figura 9. Representação espacial das componentes do Campo Geomagnético Ampliado (em vermelho) e das componentes Campo Geomagnético Principal (em preto). As componentes do Campo Geomagnético Crustal são obtidas pela subtração das componentes respectivas de cada campo. 048

Figura 10. Exemplo de projeção Mercator das posições geográficas de um espécime de tartaruga marinha sobre intensidades do campo de anomalias magnéticas ao longo de um trajeto oceânico. As regiões em vermelho indicam intensidade relativas mais fortes, azuis mais fracas e verdes intermediárias, como mostrado na escala (em nanoTesta) ao lado. 050

Figura 11. Exemplo de projeção Mercator das posições geográficas de um espécime oceânico. As regiões em vermelho indicam intensidade relativas mais fortes, azuis mais fracas e verdes intermediárias, como mostrado na escala (em nanoTesta) ao lado. 051

Figura 12. Exemplo de projeção Mercator da posição de um espécime de tartaruga marinha sobre as intensidades do campo magnético crustal referente ao entorno (área de 0,5° x 0,5°). As regiões em vermelho indicam intensidades relativas mais fortes, azuis mais fracas e verdes intermediárias, como mostrado na escala (em nanoTesta) ao lado. 052

Capítulo 4: Green turtles and the crust's magnetic field

Figure 1. Charts of the MMF's intensities (A), EMF's (B) and CMF's (C) at MSL. The region refers to initial migration of green turtles (*Chelonia mydas*) by Luschi *et al.* (1998) nearby the Ascension Island. The charts were constructed on equatorial Mercator's projections and the color scale indicates magnetic field's intensities. 059

Figure 2. Tracks of migrating green turtles (*Chelonia mydas*) by Luschi *et al.* (1998) overlapped to the CMF's intensities map. The color scale indicates the CMF's intensities at MSL. The chart was constructed on equatorial Mercator's projection. 060

Figure 3. Green turtle's (*Chelonia mydas*) tracks by Åkesson *et al.* (2003) nearby the Ascension Island (indicated by black arrow) superimposed to the CMF's intensities. The color scale indicates the CMF's intensities at MSL. 060

Figure 4. Open ocean's track of a green turtle (*Chelonia mydas*) migrating from Brazil to the Ascension Island by Witt *et al.* (2010) overlapped to the CMF's intensities. The color scale indicates the CMF's intensities at MSL. 061

Figure 5. Migration of two green turtles (A and B) at China Sea by Cheng (2000) overlapped to map of the CMF's intensities. The color scale indicates the CMF's intensities at MSL. 061

Figure 6. Migrations of two green turtles (A and B) from Guinea-Bissau to Mauritania (Africa) by Godley *et al.* (2003) overlapped to map of the CMF's intensities. The color scale indicates the CMF's intensities at MSL. 062

Figure 7. Migration of green turtles from French Frigate Shoals to Kaneohe Bay in the Main Hawaiian Islands by Balazs and Ellis (2000), overlapped to map of the CMF's intensities. The color scale indicates the CMF's intensities at MSL. 062

Figura 8. Migration of a green turtle (*Chelonia mydas*) in Mediterranean Sea by Broderick *et al.* (2007) overlapped to map of the CMF's intensities. The color scale indicates the CMF's intensities at MSL. 063

Figure 9. Track of a green turtle between Costa Rica and Nicaragua (Central America) by Tröeng *et al.* (2005) overlapped over map of the CMF's intensities. The color scale indicates the CMF's intensities at MSL. 063

Figure 10. Green turtle' tracks (A and B) nearby the Europa Island (Mozambique Channel, Africa) by Girard *et al.* (2006) overlapped to the maps of the CMF's intensities. The color scale indicates the CMF's intensities at MSL. 064

Figure 11. Tracks of green turtles from Central America to Galápagos Islands (Type A1) by Seminoff *et al.* (2008) overlapped to map of the CMF's intensities. The color scale indicates the intensities of the CMF at MSL. 065

Figure 12. Post-nesting routes with four green turtles tracked by satellite from Ogasawara Islands (Japan) by Hatase *et al.* (2006), overlapped to map of the CMF's intensities. The color scale indicates the CMF's intensities at MSL. 065

Capítulo 5: O campo de anomalias magnéticas terrestres como parâmetro em movimentos oceânicos de tartarugas-verdes (*Chelonia mydas*)

Figura 1. Componentes do campo geomagnético. O vetor campo total (F) pode ser decomposto em coordenadas cartesianas (X, Y, Z, H) e direcionais (I, D) e relacionadas pelas equações (a, b, c, d). Fonte: Butler (2004). 076

Figura 2. Movimentos migratórios de seis tartarugas-verdes (*Chelonia mydas*) ao deixarem a Ilha de Ascensão, no Oceano Atlântico Sul, rumo ao Brasil. Fonte: Luschi *et al.* (1998). 078

Figura 3. Áreas de estudo da movimentação de três espécimes de tartarugas-verdes ao redor da Ilha de Europa, no canal de Moçambique. Os espécimes T1 e T3 foram avaliados nas respectivas áreas sombreadas, enquanto o espécime T2 na área completa da figura. Fonte: Girard *et al.* (2006). 079

Figura 4. Projeção Mercator do campo de anomalias magnéticas próximas à Ilha de Ascensão (estrela preta), comparadas aos movimentos migratórios de cinco tartarugas marinhas descritas por Luschi *et al.* (1998). 080

Figura 5. Deslocamentos oceânicos de cinco espécimes de tartarugas marinhas descritas por Luschi *et al.* (1998) e projetadas individualmente sobre o campo de anomalias da crosta ao nível do mar. 081

Figura 6. Variação de intensidade do campo de anomalias geomagnéticas nas posições geográficas ocupadas por cinco espécimes descritos por Luschi *et al.* (1998). Cada animal é representado por uma cor. 082

- Figura 7. Movimentação oceânica do espécime T1 acompanhado por sinal de satélite por Girard *et al.* (2006). Foram registrados 14 posições da trajetória em projeção Mercator. 083
- Figura 8. Movimentação oceânica do espécime T2 acompanhado por sinal de satélite por Girard *et al.* (2006). Foram registradas 24 posições da trajetória em projeção Mercator. 083
- Figura 9. Movimentação oceânica do espécime T3 acompanhado por sinal de satélite por Girard *et al.* (2006). Foram registradas 20 posições da trajetória em projeção Mercator. 083
- Figura 10. Variação de intensidade do campo de anomalias geomagnéticas nas posições geográficas ocupadas por três espécimes descritos por Girard *et al.* (2006). Cada animal é representado por uma cor. 084

Capítulo 6: The magnetic field of the oceanic crust as a parameter to the movements of green turtles (*Chelonia mydas*) in the region of the Galápagos Archipelago (Ecuador)

- Figure 1. Components of the Earth's Magnetic Field and its mathematical relationships. The Total Field Intensity (F) represents the module of vector whose direction and sense indicate the field lines of the geomagnetic field. 092
- Figure 2. Movements of seven green turtle specimens (indicated by white circles) that left the Galápagos Islands in 2005 and followed by Seminoff *et al.* (2008). The geographic limits are at Mercator projection. 094
- Figure 3. Maps distribution relative to Enhanced Magnetic Field (A), Main Magnetic Field (B) and Oceanic Magnetic Crust Field (C) around the region of the Galápagos Archipelago investigated. The geographic limits in Mercator projection are the same. 096
- Figure 4. Displacements of seven green turtles positions (numbers indicated by white circles and marked by yellow crosses), leaving the Galápagos archipelago, over the magnetic field intensity of crust distribution at the region near around. 097
- Figure 5. Three-dimensional projection of geomagnetic anomalies (F) of Crust determined to 2005 and mean sea level, around Galápagos Archipelago (near red colors). The height dimension (F) is enlarged for better viewing. 098
- Figure 6. Comparison between oceanic movements of seven green turtles and the 3D projection of crustal magnetic field around the Galapagos Islands. 099
- Figure 7. Crust's field on 0.5 by 0.5 degrees around areas to the turtles. Red color indicates strongest areas and blue weak. Bracket numbers show the identification of the position in the path from the beginning of the ocean crossing. The lines in white color indicate the direction of local maximum and minimum. 100

Figure 8. Graphs representing the crustal magnetic field variation over all points on trajectories of the animals and at half by half degrees around area. Intensities concerning to the animals (TURTLE) is represented by black lines, to local maxima by red (LOCAL MAX), minimum by orange (LOCAL MIN) and the respective local means by blue (LOCAL MEAN). 101

Capítulo 7: O campo magnético da crosta terrestre e seu relacionamento com movimentos oceânicos de tartarugas-de-couro (*Dermochelys coriacea*) no Oceano Atlântico Sul

Figura 1. Área de estudo. Movimentos oceânicos de tartarugas de couro na parte sudoeste do Oceano Atlântico descritos por Lopez-Mendilaharsu *et al.* (2009), onde foram registradas as coordenadas dos espécimes T1 (uma fêmea indicada pela cor laranja no gráfico) e T2 (macho indicado pela cor azul). 111

Figura 2. Representação gráfica das componentes do campo geomagnético. O vetor F representa o campo total, derivado das componentes Norte-Sul (X), Leste-Oeste (Y) e Vertical (Z), todas na unidade nanoTesla (nT). A equação (1) mostra como obter-se a intensidade de F a partir das demais componentes do campo. Fonte: Teixeira *et al.* (2009). 112

Figura 3. Distribuição da intensidade de campo magnético total (F) relativa ao Campo Principal (A), Campo Ampliado (B) e Crosta Oceânica (C) da região de estudo, comparada à movimentação dos espécimes T1 (pontos e linhas pretas) e T2 (pontos e linhas brancas). O mapa foi construído em projeção Mercator. 114

Figura 4. Distribuição do campo total (F) referente à crosta oceânica, ao nível do mar, sobreposto pela primeira parte (T1-A) do trajeto do espécime T1 (círculos brancos). A estrela preta representa o início do trajeto e a numeração dos pontos brancos indica a ordem de ocupação sequencial das posições. 116

Figura 5. Distribuição do campo magnético total (F) referente à crosta oceânica, sobreposto pela segunda parte (T1-B) do trajeto do espécime de tartaruga T1 (círculos brancos). A numeração dos pontos brancos indica a ordem de ocupação sequencial das posições ao longo do trajeto. 116

Figura 6. Distribuição do campo magnético total (F) referente à crosta oceânica, sobreposto pela terceira parte (T1-C) do trajeto do espécime de tartaruga T1 (círculos brancos). 117

Figura 7. Distribuição do campo magnético total (F) referente à crosta oceânica, sobreposto pela quarta parte (T1-D) do trajeto do espécime de tartaruga T1 (círculos brancos). O círculo preto mostra o término das medições. 117

Figura 8. Distribuição do campo magnético total (F) referente a quatro posições (2, 8, 18 e 54) do trajeto do espécime T1. As nuances de cores (mais intenso em azul e mais fraco em vermelho), mostram que o animal navega por regiões de intensidades relativamente moderadas do campo. 118

- Figura 9. Disposição das intensidades locais de F (nT) em área de 0,50x0,50 ao redor dos 52 pontos do trajeto de T1 (em preto). As intensidades máximas estão representadas na cor vermelha, mínimas em laranja e médias em azul. 119
- Figura 10. Distribuição de F referente à crosta, sobrepostas pela primeira parte (T2-A) do trajeto do espécime T2 (círculos brancos). A estrela preta representa o início do trajeto e a numeração dos pontos brancos indica a ordem de ocupação sequencial das posições. 120
- Figura 11. Distribuição de F referente à crosta oceânica, sobrepostas pela segunda parte (T2-B) do trajeto do espécime de tartaruga T2 (círculos brancos sequenciais). 120
- Figura 12. Distribuição de F referente à crosta, sobrepostas pela última parte (T2-C) do trajeto do espécime de tartaruga T2 (círculos brancos). O círculo preto mostra o término das transmissões por satélite. 121
- Figura 13. Distribuição de F referente à quatro posições (1, 12, 30 e 45) no trajeto do espécime T2. As nuances de cores (mais intenso em azul e mais fraco em vermelho), mostra que o animal está sempre em regiões de intensidades relativamente moderadas do campo. 121
- Figura 14. Disposição das intensidades de F para os 47 pontos do trajeto de T2 (em preto). As intensidades (em nT) máximas estão representadas na cor vermelha, mínimas em laranja e médias em azul. 122

LISTA DE TABELAS

Capítulo 1: O campo magnético terrestre

	Pag.
Tabela 1. Classificação das unidades magnéticas mais utilizadas e suas respectivas unidades no Sistema Internacional e CGS. Os fatores de conversão estabelecem a proporcionalidade numérica entre elas. Fonte: INMETRO (2013).	013
Tabela 2. Intensidades de campo magnético nos planetas do Sistema Solar, comparados com seus respectivos raios equatoriais e períodos de rotação. Fonte: Campbell (2003).	020

Capítulo 3: Métodos

Tabela1. Identificação, intensidades máxima e mínima, e unidades físicas dos elementos geomagnéticos do campo principal pelo modelo WMM2010. Fonte: WMM (2010).	041
---	-----

Capítulo 4: Green turtles and the crust's magnetic field

Table 1. Identification of the researchers with the respective publication dates included, date of data collection, locations and their limits of geographical coordinates (latitudes and longitudes in degrees).	058
Table 2. Identification of main centers of the CMF's anomalies by numbers (Nr.) nearby the green turtle's tracks for all researchers cited. The CMF's intensities (nT unity) are relative to center of the anomalies and their respective coordinates (latitudes and longitudes) are included.	066

Capítulo 5: O campo de anomalias magnéticas terrestres como parâmetro em movimentos oceânicos de tartarugas-verdes (*Chelonia mydas*)

Tabela 1. Intensidades máximas, mínimas e médias do campo de anomalias magnéticas referentes às diversas posições ocupadas (n) por cinco espécimes de tartarugas marinhas, acompanhadas por Luschi <i>et al.</i> (1998).	082
Tabela 2. Intensidades máximas, mínimas e médias do campo de anomalias magnéticas referentes às diversas posições ocupadas (n) por três espécimes de tartarugas marinhas, acompanhadas por Girard <i>et al.</i> (2006).	084

Capítulo 6: The magnetic field of the oceanic crust as a parameter to the movements of green turtles (*Chelonia mydas*) in the region of the Galápagos Archipelago (Ecuador)

Table1. Percentage values on crust's magnetic field at surrounding areas (0.5 by 0.5 degrees) relative to the turtle's positions as seen at equations 2-5. Averages to (n) positions of all specimens, at turtle's positions (F_t), local mean (F_{mean}), relative percentage on F_t-F_{mean} (P1), module difference percentage variation F_t-F_{mean} (P2), relative percentage to local maximum (P3), relative percentage to local minimum (P4). The units of F_t and F_{mean} are nT and others %.

102

Capítulo 7: O campo magnético da crosta terrestre e seu relacionamento com movimentos oceânicos de tartarugas-de-couro (*Dermochelys coriacea*) no Oceano Atlântico Sul

Tabela 1. Dados relativos entre a intensidade de campo crustal na posição da tartaruga (F_t) na região do entorno ($0,5^\circ \times 0,5^\circ$), médias ($F_{médio}$), máximos (F_{max}) e mínimos (F_{min}) locais, nas posições geográficas ocupadas pelo animal T1 durante toda sua rota migratória.

119

Tabela 2. Dados relativos entre a intensidade de campo crustal na posição da tartaruga (F_t) na região do entorno ($0,5^\circ \times 0,5^\circ$), médias ($F_{médio}$), máximos (F_{max}) e mínimos (F_{min}) locais, nas posições geográficas ocupadas pelo animal T2 durante toda sua rota migratória.

122

APRESENTAÇÃO

Introdução

O magnetismo já era conhecido pelos chineses séculos antes de Cristo. Desde o século VII a.C., textos gregos já faziam referência à observação de propriedades magnéticas de corpos constituídos por minerais provenientes da região de Magnésia, daí o nome magnetismo. Estudado cientificamente apenas no século XV, foi somente com William Gilbert, em 1600, que o magnetismo terrestre passou a ser fonte de investigação quanto à sua origem e comportamento. O campo magnético é uma extensa estrutura da Terra, expandindo sua atuação pelo espaço sideral a distâncias de 100 vezes o raio do planeta. O campo é produzido por fortes movimentos de fluidos ionizados do núcleo externo terrestre, induzindo o aparecimento de correntes elétricas num processo auto-sustentável, chamado geodínamo. O campo magnético terrestre (CMT) é basicamente bipolar, havendo também as contribuições das interações do vento solar e da crosta do planeta. Assim, o CMT pode ser analisado como resultante de três fontes principais: o campo magnético principal (*Main Field*, gerado pelo núcleo, produzindo uma região próxima chamada dinamosfera), o campo da crosta (resultante de processos geológicos em rochas da litosfera) e o campo externo (continuamente modificado pela interação com o espaço sideral), gerando a magnetosfera planetária (Gilbert, 1991; Backus *et al.*, 1996; Stern, 2002; Campbell, 2003; Miranda, 2004; Halliday *et al.*, 2004).

Modelos matemáticos modernos, que utilizam fontes de informações baseadas em estações geomagnéticas, dados de satélites e navios oceanográficos de investigação geofísica, descrevem o campo magnético terrestre com relativa precisão para todo o globo. Os principais modelos geomagnéticos utilizados a nível mundial são: o Modelo do Campo Geomagnético Internacional de Referência (International Geomagnetic Reference Field - IGRF), o Modelo de Anomalias Magnéticas Terrestres (Earth Magnetic Anomaly Grid - EMAG), o Modelo Magnético Mundial (World Magnetic Model - WMM) e o Modelo do Campo Magnético Ampliado (Enhanced Magnetic Model - EMM). Atualizados a cada cinco anos, estes modelos fornecem matematicamente a intensidade e a direção do campo geomagnético, sendo utilizados em pesquisas geofísicas conforme as condições e as necessidades de análise (IAGA, 2012; EMAG2, 2012; WMM2010, 2012; EMM2010, 2012).

Hoje, sabemos que o campo geomagnético é capaz de interferir em muitos fatores ligados ao meio ambiente, causando alterações naturais de condições climáticas e também sobre as atividades humanas. Entre estes podemos citar: “apagões elétricos” (desligamento da

rede elétrica por indução, durante tempestades magnéticas), aumento da corrosão sobre tubulações oceânicas (por correntes telúricas, que alteram os sistemas de proteção catódica), interferências sobre satélites de posicionamento (tais com cintilações em sinais de GPS), alterações de dados em instrumental de aeronaves, danos em satélites de investigação científica e interposições nas transmissões de rádio. A variabilidade do campo geomagnético é um fator de impacto ambiental tanto sobre aspectos físicos quanto biológicos, o que tem estimulado pesquisadores a criar uma área de estudo específica: o geomagnetismo ambiental (Verosub e Roberts, 1995; Dekkers, 1997; Evans e Heller, 2003; Liu *et al.*, 2012).

As longas migrações de tartarugas marinhas sempre foram um grande enigma para a investigação científica, devido ao fato destes animais percorrerem grandes extensões no oceano e obterem êxito com grande precisão. Acredita-se haver um conjunto de parâmetros oceanográficos como possíveis componentes deste mecanismo de orientação oceânica, tais como temperatura oceânica, ação de correntes de água ou ar, alimentação, e, dentre estes, pode-se ainda incluir o magnetismo terrestre. Trabalhos recentes mostram alterações no comportamento de animais marinhos, quando submetidos à interações magnéticas produzidas em laboratório. A reprodução de condições externas do campo magnético natural, mostrou também alterações no comportamento de tartarugas marinhas. Porém, ainda não se tem um modelo determinístico para a sua navegabilidade em mar aberto (Akesson *et al.*, 2003; Avens, 2003; Lohmann *et al.*, 2007; Johnsen e Lohmann, 2008; Seminoff *et al.*, 2008; Sale e Luschi, 2009; Lohmann, 2010).

O presente trabalho realizará um estudo acerca da relação entre a distribuição do campo magnético terrestre e o posicionamento geográfico de tartarugas marinhas (tartarugas-verdes e de-couro), durante os seus movimentos oceânicos. Será utilizada uma variável, ainda não incorporada por outros trabalhos de investigação científica, definida pela contribuição do campo magnético relativo à crosta terrestre. Embora de menor intensidade absoluta, o campo magnético da crosta produz padrões bem definidos para cada região marinha, o que serve de indicativo na busca por uma relação entre este e os complexos movimentos assumidos por estes animais aquáticos.

Objetivo Geral

O presente trabalho tem como principal objetivo identificar relações entre o campo magnético natural terrestre e a movimentação oceânica de tartarugas marinhas.

Objetivos Específicos

- Caracterizar o campo magnético natural terrestre como fator de interferência ambiental, descrevendo sua origem, representação matemática, além de interferências diretas e indiretas sobre o ambiente marinho (Capítulo 1).
- Identificar as principais linhas de investigação científica acerca de movimentos oceânicos envolvendo tartarugas marinhas, e seu relacionamento com o campo magnético terrestre (Capítulo 2).
- Estruturar uma metodologia matemática para a determinação da intensidade e distribuição espaço-temporal do campo magnético da crosta terrestre, através do uso de softwares específicos, com projeção georreferenciada (Capítulo 3).
- Relacionar a distribuição espacial do campo de anomalias magnéticas terrestre aos movimentos migratórios de tartarugas-verdes (*Chelonia mydas*) para regiões oceânicas demarcadas (Capítulos 4 e 5).
- Investigar o relacionamento entre a intensidade total do campo magnético da crosta terrestre aos movimentos migratórios de tartarugas-verdes (*Chelonia mydas*) e tartarugas-de-couro (*Dermochelys coriacea*), realizados em regiões oceânicas e épocas distintas (Capítulo 6 e 7).

Estrutura da tese

A tese foi dividida em sete capítulos, conforme os objetivos específicos, incluindo ainda as considerações finais. Os três capítulos iniciais estruturam o trabalho através de pesquisa em publicações científicas, e elaboração de metodologia específica. Os quatro capítulos finais mostram estudos de caso, obtidos em forma de artigos de investigação científica, com formatos, metodologia e referências específicas, dos periódicos aos quais foram e/ou serão submetidos.

Capítulo 1

O campo magnético terrestre

Neste capítulo faz-se um estudo acerca do desenvolvimento histórico, conceituação científica e representação matemática, do campo magnético terrestre. São descritas suas principais características físicas e matemáticas, bem como suas diversas interferências sobre o ambiente do planeta.

Capítulo 2

As tartarugas marinhas e o magnetismo terrestre

Descreve modernos estudos de investigação biológica e ecológica, que relacionam o comportamento de tartarugas marinhas ao campo magnético. Apresenta ainda, estudos acerca do monitoramento das principais hipóteses formuladas, além de resultados obtidos sobre os condicionantes da navegabilidade destes animais.

Capítulo 3

Métodos

Apresenta ferramentas necessárias na determinação das componentes matemáticas do campo magnético terrestre, através de modelos matemáticos a nível global. Inclui uma interpretação física e matemática do campo geomagnético, metodologia de projeção cartográfica georreferenciada deste campo e uma representação digital do posicionamento de tartarugas marinhas, para as diversas regiões oceânicas.

Capítulo 4

Green Turtles and the Crust's Magnetic Field

Artigo publicado na revista científica *Ciencia y Tecnología del Mar* - Vol. 34 (1 y 2), 2011 - ISSN 0718-0969. Descreve a relação entre o campo de anomalias magnéticas da crosta oceânica e a movimentação de tartarugas-verdes (*Chelonia mydas*), em diversas regiões oceânicas. Onze trabalhos de investigação científica, já publicados, são utilizados como referências de dados numéricos na avaliação.

Capítulo 5

O campo de anomalias magnéticas terrestres como parâmetro em movimentos oceânicos de tartarugas-verdes (*Chelonia mydas*)

Artigo a ser enviado ao periódico “The Journal of Experimental Biology” (The Company of Biologists Limited). Descreve o comportamento do campo de anomalias magnéticas para tartarugas marinhas, nas proximidades das Ilhas de Ascensão (Oceano Atlântico) e Europa (Canal de Moçambique – África). O trabalho mostra características comuns entre posições de navegação dos animais e a distribuição das intensidades do campo magnético de anomalias.

Capítulo 6

The magnetic field of the oceanic crust as a parameter to the movements of green turtles (*Chelonia mydas*) in the region of the Galápagos Archipelago (Ecuador)

Artigo a ser enviado ao periódico “Endangered Species Research” (Inter-Research). Apresenta uma avaliação entre a intensidade total do campo magnético da crosta e movimentos oceânicos de sete tartarugas-verdes (*Chelonia mydas*) ao retornarem das praias de desova nas Ilhas Galápagos (Oceano Pacífico), com destino ao continente.

Capítulo 7

O campo magnético da crosta oceânica e seu relacionamento com movimentos de tartarugas-de-couro (*Dermochelys coriacea*) no Oceano Atlântico Sul

Artigo a ser apresentado ao periódico “Journal of Experimental Marine Biology and Ecology”. Descreve o comportamento do campo magnético da crosta oceânica nas posições geográficas ocupadas por tartarugas-de-couro (*Dermochelys coriacea*), em migração nas proximidades da costa brasileira.

Considerações Finais

São apresentadas as principais conclusões obtidas da relação entre o campo magnético natural e a movimentação dos animais marinhos, através da análise dos quatro estudos de caso realizados. Oferece também, recomendações para futuros trabalhos de pesquisa a serem desenvolvidos nesta área.

CAPÍTULO 1

O Campo Magnético Terrestre

1.1 Histórico

O conhecimento do magnetismo sempre fascinou a humanidade, tanto pelo fato de ser uma força invisível quanto por seus efeitos sobre os metais, considerado pelos antigos como uma “força mágica”. Historiadores têm descrito o magnetismo como um dos mais antigos conhecimentos da humanidade (Stern, 2002), pois, a cerca de 1000 A.C., observadores chineses já haviam notado que pequenos filamentos de rochas magnetizadas apontavam para o Sul quando colocadas livres sobre a água. Somente por volta do ano 1150 d.C. é que chegam à Europa, os primeiros instrumentos capazes de identificar, mesmo com pouca precisão, a direção Norte-Sul, antes apenas associada às posições relativas do posicionamento das estrelas. As primeiras bússolas simples eram capazes de fornecer a direção geográfica Norte-Sul de forma aproximada (Vershuur, 1993). Em 1450 d.C. são feitas as primeiras medições da variabilidade do campo magnético terrestre com a latitude (Smith, 1992), estabelecendo-se a declinação magnética (ângulo relativo entre o Norte geográfico e o Norte magnético).

Além de auxiliar na navegação oceânica, a bússola (Fig. 1) foi de fundamental importância na expansão marítima na Europa dos séculos XV e XVI. Em 1576, Robert Norman (1550-1600) identificou as variações verticais do campo, ou seja a inclinação magnética terrestre (Barraclough, 2000). Estas variações foram registradas por inúmeros navegadores e até hoje são utilizadas como referência histórica da variabilidade do campo magnético terrestre ao longo do tempo.



Fig. 1. Bússola portuguesa de navegação do século XV. Cópia do Instituto Smithsonian do original no “Museum of the History of Science”, Cambridge University. Fonte: Multhauf (1987).

O primeiro trabalho científico moderno sobre o campo magnético terrestre foi publicado em 1600 por William Gilbert (1544-1603) e chamado de “De Magnete” (Gilbert, 1991). Em seu livro (Fig. 2), Gilbert demonstra várias propriedades do magnetismo, descreve as diversas formas de uso das bússolas e apresenta a ideia do nosso planeta como um grande ímã.



Fig. 2. Página central da edição de 1620 do livro “De Magnete” de William Gilbert, primeiro trabalho de investigação científica moderna do geomagnetismo. Fonte: Stern (2002).

Em 1634, Henry Gellibrand (1597-1636) mostrou que o campo magnético da Terra é capaz de adquirir alterações ao longo do tempo, constatado através de anos seguidos de observações. Em 1690, Edmund Halley (1656-1742) realizou pesquisas magnéticas no Atlântico e sugeriu que as mudanças no campo são devido a movimentos no interior profundo da Terra (Clark, 2000). Em 1770, o capitão James Cook (1728-1779) registrou a declinação magnética em várias áreas do globo durante sua expedição de circunavegação, dados estes importantíssimos para a navegação oceânica (Campbell, 2003). Em 1820, Hans Christian Oersted (1777-1851) determinou, através de experimentos, que uma corrente de cargas elétricas pode gerar um campo magnético e, conseqüentemente, modificar a posição de uma bússola. Em 1835, Carl Friedrich Gauss (1777-1855) criou um método para medição da intensidade do campo magnético, sendo, por isso, homenageado com seu nome na unidade do campo magnético (Halliday *et al.*, 2004). Com a necessidade de determinação da declinação magnética, criaram-se muitos observatórios magnéticos para o desenvolvimento de pesquisas nesta área. Gauss e Wilhelm Weber (1804-1891) iniciaram, em 1834, a criação do "Gottingen Union Magnetic", uma rede internacional de observatórios magnéticos. James Clark Ross (1800-1862) determinou, em 1831, com muita precisão para a época, a posição do polo norte magnético terrestre (Good, 1991) e Michael Faraday (1791-1867) propôs a ideia de representar o campo por linhas magnéticas, ampliando a interpretação matemática do campo magnético (Fig. 3).

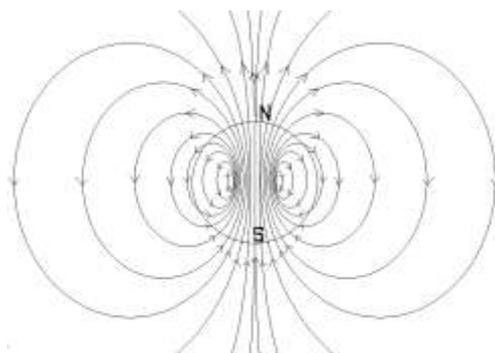


Fig. 3. Linhas de campo magnético idealizadas por Faraday, mostrando a bipolaridade e o sentido de distribuição do campo. Fonte: Halliday *et al.* (2004).

Essas "linhas de força" (modernamente chamadas de linhas de campo) se espalham a partir do Norte e convergem novamente no Sul. Isto não só descreve o padrão de direções da força magnética, mas também fala sobre a força: onde as linhas se aglomeram a força é forte e onde são muito espaçadas, fraca (Fig. 3). Estes conceitos levaram à teoria do geodínamo, que propõe haver um movimento fluido de cargas elétricas no núcleo, como predizeram Ampere e Faraday, capaz de gerar o campo magnético da Terra. Este fato tem uma comprovação fora da Terra, na observação de manchas solares, que distribuem-se conforme o campo magnético gerado pelo núcleo solar (Butler, 2004). Em 1919, Sir Joseph Larmor (1857-1942) mostrou que o movimento das manchas solares segue a mesma configuração dos campos magnéticos gerados pelos fluxos de matéria em sua superfície (Larmor, 1929). Arthur Schuster (1851-1934) foi o primeiro a propor que as atividades magnéticas no Sol também ocorreriam no campo magnético terrestre (Warwick, 1971). Hoje, o comportamento do campo pode ser avaliado por desenvolvimento numérico em computador, a partir de dados de satélite, e sua evolução temporal prevista com precisão (Coe *et al.*, 2000). Diversos modelos globais foram desenvolvidos, considerando tanto a teoria clássica de Gauss, como também novos avanços tecnológicos e o uso de super-computadores, além de magnetômetros instalados em satélites (Maier, 2003).

1.2 Grandezas e unidades físicas utilizadas no magnetismo

1.2.1 Campo magnético

A expressão campo magnético é utilizada indistintamente para dois tipos de representações matemáticas com características vetoriais (possuem módulo, direção e sentido), chamadas de vetor **B** e vetor **H**. O vetor **B** relaciona a fonte magnética a suas interações com o ambiente externo, enquanto o vetor **H** acrescenta à intensidade de **B**, magnetizações produzidas no interior do corpo estudado (Maus, 2007).

- **Campo magnético, densidade de fluxo ou indução magnética (B)**

É a indução uniforme capaz de produzir uma força constante de 01 Newton (N) por metro de um condutor retilíneo, situado no vácuo, e percorrido por uma corrente invariável de 01 Ampere (A). Sendo perpendiculares entre si as direções da indução magnética, da força e da corrente. Também denominada por densidade de fluxo magnético, suas unidades são o **Gauss** (G), no sistema Centímetro-Grama-Segundo (CGS), e **Tesla** (T), Sistema Internacional de Unidades (SI).

- **Campo Magnético (H)**

É a intensidade de um campo uniforme, criado por uma corrente invariável de 01 Ampere, que percorre um condutor retilíneo de comprimento infinito e de área de seção transversal desprezível, em qualquer ponto de uma superfície cilíndrica de diretriz circular com 01 metro (m) de circunferência, e que tem como eixo o referido condutor. A unidade de campo magnético (H), no Sistema Internacional, é Ampère por metro (**A/m**). Apesar do esforço em utilizar as unidades do SI, muitos equipamentos de medidas ainda utilizam as unidades do sistema CGS, no qual o campo é medido em **Oersted** (Oe).

As equações (1) e (2) abaixo mostram a relação entre **H** e **B**, no SI e no CGS:

$$B = \mu_0 (H + M) \quad (\text{SI}) \quad (1)$$

$$B = H + 4\pi M \quad (\text{CGS}) \quad (2)$$

Nas relações anteriores, M é a **magnetização** de um material na presença de um campo magnético e μ_0 a permeabilidade magnética do vácuo, de valor igual a $4\pi 10^{-7}$ H.m. Estas relações estabelecem a ligação entre o campo externo e as propriedades magnéticas internas. Na ausência de um meio material, ou seja, no vácuo ou próximo dele, as equações (1) e (2) tornam-se:

$$B = \mu_0 H \quad (\text{SI})$$

$$B = H \quad (\text{CGS})$$

Assim, sem a presença de um meio material, em unidades CGS, o campo magnético é igual à indução magnética, e a unidade Gauss é numericamente equivalente ao Oersted.

1.2.2 Fluxo Magnético (ϕ)

É o fluxo uniforme através de uma superfície plana de área igual a 01 metro quadrado, perpendicular à direção de uma indução magnética uniforme de 01 Tesla. A unidade de fluxo magnético no Sistema Internacional de Unidades é o Weber (Wb).

As principais unidades destas grandezas reconhecidas no Brasil estão representadas na Tabela 1, conforme o sistema adotado.

Tabela 1. Classificação das unidades magnéticas mais utilizadas e suas respectivas unidades no SI e CGS. Os fatores de conversão estabelecem a proporcionalidade numérica entre elas. Fonte: INMETRO (2013).

Grandeza	Unidade (SI)	Unidade (CGS)	Conversão
Campo Magnético (H)	Ampére/metro (A/m)	Oersted (Oe)	1 Oe = 79,577 A/m
Campo Magnético (B)	Tesla (T)	Gauss (G)	1 T = 10^4 G
Fluxo Magnético (ϕ)	Weber (Wb)	Maxwell (Mx)	1Wb = 10^8 Mx

O fluxo magnético é uma variável muito utilizada em pesquisas envolvendo propriedades das estruturas atômicas, caracterizadas pela reação da matéria à inserção de fortes campos magnéticos gerados em laboratório. A Física Quântica é uma área onde estas propriedades são investigadas.

No presente trabalho, será abordada a interferência do campo magnético terrestre sobre o ambiente marinho, referindo-se sempre ao campo magnético **B**. Em pesquisas geofísicas onde a estrutura interna de rochas são estudadas, a intensidade do campo magnético **H** é priorizada devido às interferências de magnetizações recentes ou antigas (paleomagnetismo) sobre os corpos estudados.

1.3 As origens do campo geomagnético

O campo magnético terrestre é resultante de diversas contribuições, as mais intensas geradas pelo interior do planeta e outras originadas pelo ambiente espacial que envolve o planeta. Emissões de partículas do espaço exterior contendo prótons, elétrons e átomos ionizados provenientes de processos estelares atingem nosso planeta diariamente, causando turbulências e criando um “clima espacial”, capaz de influir sobre o equilíbrio da biosfera (Dekkers, 1997; Evans, 2003; Jackson, 2003).

➤ Origem Interna

Dentre as diversas camadas da Terra (Fig. 4), o núcleo possui temperaturas de até 5000°C, ultrapassando o limite de cerca de 500°C (chamada temperatura Curie) no qual qualquer material perde a capacidade de magnetização permanente. O processo geodínamo corresponde à transformação da energia mecânica em energia eletromagnética. O núcleo externo possui um fluido eletricamente condutor capaz de gerar variações de fluxo magnético e, assim, reforçar o campo original do planeta, formando o chamado campo magnético principal (*main field*). Se não houvesse movimento do fluido, o campo magnético não iria se sustentar, decaindo com o tempo; é o que, acredita-se, ter ocorrido com o planeta Marte a bilhões de anos atrás, conforme dados de sondas interplanetárias (Acuña *et al.*, 1999). A sustentação do processo geodínamo depende da velocidade deste fluido (em torno de 10 km/ano), de sua composição (basicamente de Ferro), de sua viscosidade (próxima a da água), de movimentos de convecção (causados pela ação da gravidade) e da rotação do planeta, o que gera alterações de fluxo magnético no núcleo interno. Assim, o campo magnético que medimos na superfície da Terra é o resultado da ação de inúmeros efeitos conjugados (Bloxham e Gubbins, 1989; Lowrie, 2004; Pinheiro, 2012).

Como consequência destas variações complexas, identifica-se alterações no campo ao longo das eras geológicas, identificadas pelo deslocamento de linhas de magnetização em rochas na superfície. Variações lentas deste campo são chamadas variações seculares, porém o processo completo, que seria explicado pela área da Física chamada Magneto-Hidrodinâmica, carece de informações experimentais suficientes, acerca da constituição e da dinâmica do núcleo terrestre (Campbell, 2003; Friis-Christensen *et al.*, 2006).

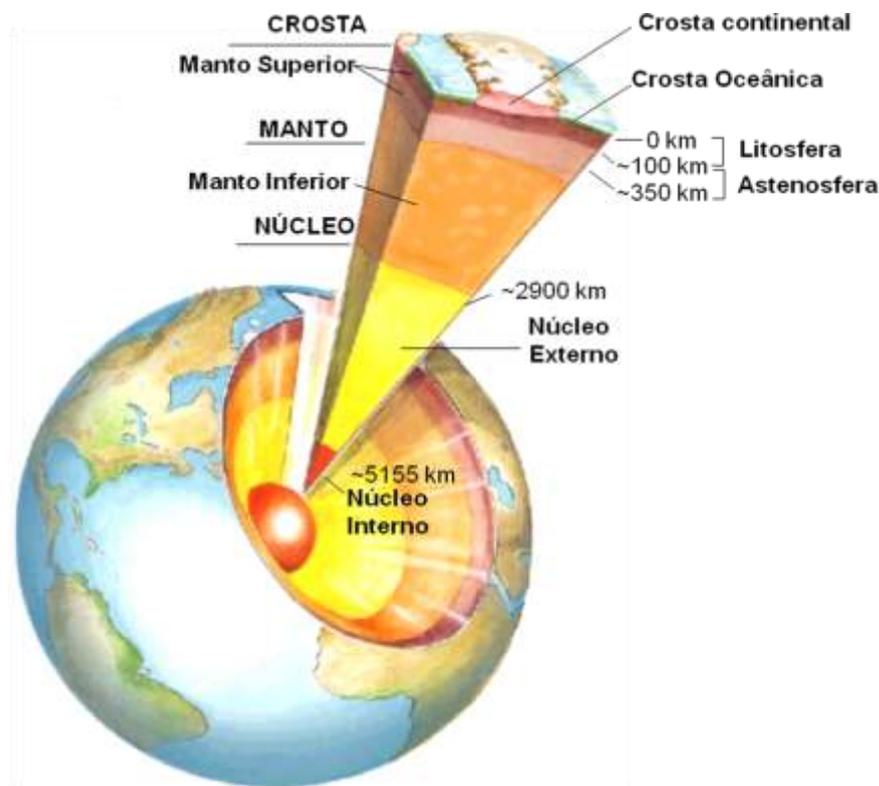


Fig. 4. O interior do planeta. As três principais camadas da Terra (CROSTA, MANTO e NÚCLEO) possuem subdivisões com características próprias. Fonte: Keary e Vine (1990).

➤ Origem Externa

Na ionosfera (camada entre 100 e 1000 km de altitude) ocorre um processo semelhante ao geodínamo, chamado “Dínamo Ionosférico”. Ele é produzido por correntes induzidas tanto pelo núcleo externo como pela atividade solar e lunar. Estas variações são devidas principalmente às atividades do vento solar sobre o planeta, sendo de intensidades da ordem de dezenas de nT. São relativamente inferiores, comparadas às do campo principal, da ordem de milhares de nT, podendo ser periódicas (diárias) ou irregulares. As variações geradas pela crosta terrestre estão próximas às intensidades das variações rápidas ocorridas na ionosfera, diferindo destas por serem relativamente constantes para espaços de tempo curtos (Haagmans *et al.*, 2008).

1.4 A magnetosfera e o ambiente terrestre

O campo magnético terrestre atua em uma região ao redor do planeta na qual é capaz de alterar o ambiente e causar efeitos específicos. Chama-se magnetosfera (Fig. 5) à região acima da parte exterior da atmosfera onde o campo magnético é capaz de controlar efeitos eletrodinâmicos entre átomos e moléculas ionizadas (Gubbins e Herrero-Bervera, 2007). Esta estrutura é altamente complexa, pois suas variantes dependem não só da constituição da atmosfera do planeta como também da interação exercida pelo Sol e do movimento orbital do planeta. A estrutura origina alterações no ambiente externo, denominado “clima espacial” (Space Weather - NOAA, 2012).

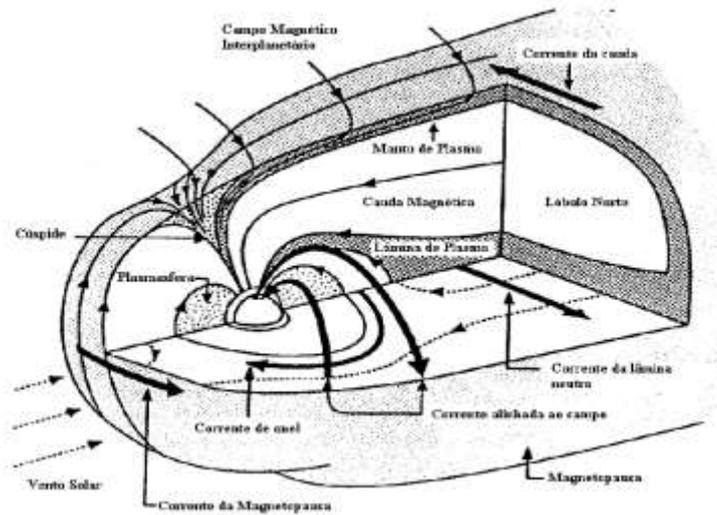


Figura 5. Estrutura da magnetosfera. Na interação entre o campo magnético terrestre e o ambiente espacial, diversas regiões são criadas, formando o que chamamos de “clima espacial”. Fonte: Teixeira *et al.* (2009).

A dinamosfera (Fig. 6) corresponde à região onde ocorre a máxima atuação do campo magnético terrestre gerado pelo núcleo terrestre. Sua altitude limítrofe está em torno de 100 km, acima do nível médio do mar (Stern, 2002).

Altitude (km)	Temperatura	Ionização	Campo Magnético	Propagação	Geral
100000	Termosfera	Protonosfera	Magnetosfera	Ionosfera	Atmosfera Superior
10000		Ionosfera			
1000	Mesosfera	Neutrosfera	Dinamosfera	Troposfera	Atmosfera Inferior
100	Estratosfera				
10	Troposfera				

Fig. 6. A magnetosfera enquadrada no ambiente atmosférico da Terra. Sua influência estende-se a partir de 100 km de altitude, podendo atingir 100 mil km da superfície terrestre. Adaptado de Seeber (2003).

A magnetosfera estende-se acima de 100 km de altitude (Fig. 6), possuindo dimensões planetárias. Embora com intensidade menor que da dinamosfera, sua interação com o vento solar a torna vital para a manutenção da estabilidade ambiental do planeta, já que favorece a um equilíbrio energético (Jackson, 2003). Estas fortes interações, que ocorrem entre o vento solar e o campo protetor terrestre na região da magnetosfera, fazem com que as condições de vida sejam sustentáveis. Pesquisas realizadas pela NASA, acerca do campo magnético do planeta Marte (Winterhalter, 2011), sugerem que este não possui condições de vida, devido à redução brusca de seu campo magnético, ocorrida há 4 bilhões de anos. Assim, estudos mostram que a magnetosfera terrestre é um dos mais importantes condicionantes para a relativa estabilidade biológica de nosso ambiente (Dekkers, 1997).

Existem fortes interferências causadas por variações da magnetosfera, não só para condições climáticas como também para atividades humanas (Fig. 7), dentre as quais pode-se destacar:

- Danos em satélites meteorológicos e de pesquisa científica, causando perda de dados por horas ou dias e, muitas vezes, inviabilizando transmissões de telemetria;
- Alterações em dados de instrumental de navegação aérea, também gerando danos a equipamentos aeronáuticos ou mesmo mudanças de rotas;
- Produção de correntes induzidas sobre redes elétricas, produzindo interrupções de energia elétrica ou mesmo a queima de transformadores;
- Interação com correntes telúricas sobre dutos condutores, ocasionando aumento de corrosão sobre metais de tubulações oceânicas;
- Modificações nas transmissões de ondas curtas de rádio, originando “blackouts” de estações transmissoras.

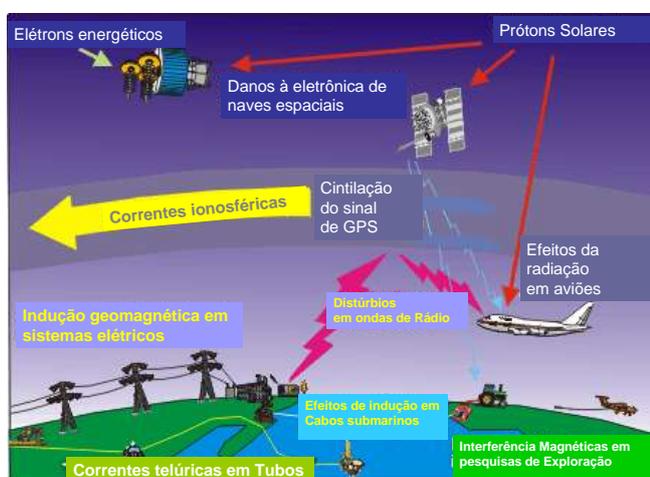


Fig. 7. Principais efeitos ligados ao campo magnético terrestre sobre atividades humanas. Adaptado de Space Weather – Canadá (2012).

1.5 O modelo geofísico atual

Segundo o modelo geofísico atual, o Campo Magnético Terrestre (CMT) é composto por três contribuições distintas:

- **Campo Magnético Principal (CMP)**, gerado por fluxos do núcleo externo, conhecido por processo geodínamo, de cargas elétricas formadas principalmente por íons de Ferro em movimento produzem campos magnéticos.
- **Campo Magnético da Crosta (CMC)**, gerado pela camada externa de rochas da crosta terrestre (parte superior da litosfera com espessura medindo até 100 km).
- **Campo Magnético Externo (CME)**, gerado pelo impacto de partículas com cargas elétricas do vento solar sobre a ionosfera, além daquelas provenientes do espaço profundo.

A intensidade do CMP, também conhecida por Intensidade Total ou Campo Total (F), varia na superfície terrestre entre 22.000 e 67.000 nanoTesla (nT). Com relação ao CMC, varia entre dezenas e centenas de nT, dependendo da constituição das rochas de cada região. As variações de origem externa (CME), ocorridas na ionosfera, são rápidas, inconstantes e dependentes das emissões solares, variando de dezenas a milhares de nT, no caso de haver tempestades magnéticas (Matzner, 2001; Butler, 2004; Olsen *et al.*, 2010).

A magnetosfera (Fig. 8) distribui-se ao longo do espaço com dimensões aproximadas de 10 por 100 raios terrestres (Lanza e Meloni, 2006). Esta estrutura gigantesca é capaz de interferir no vento solar e provocar o aparecimento das Auroras Polares (Alexandrescu *et al.*, 1996). Sabe-se que a todo momento o vento solar comprime a magnetosfera, causando o aparecimento de áreas de maior ou menor intensidades de radiação sobre a superfície.

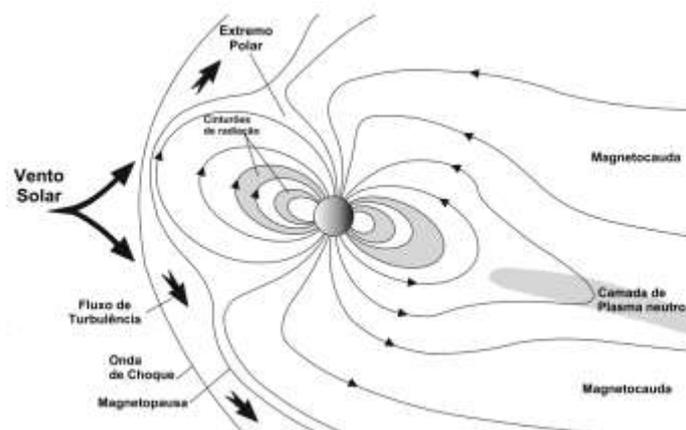


Fig. 8. A magnetosfera da Terra e os efeitos do vento solar. A magnetosfera é comprimida por ondas de choque do vento solar. A área cinza chama-se cinturão de Van Allen (com até 25 mil km) formado por partículas do vento solar que interagem com a atmosfera e alinham-se de acordo com o campo magnético terrestre. Adaptado de Campbell (2003).

Como afirma Dal Poz (2005), em texto a seguir, o Sol tem papel fundamental no ambiente atmosférico terrestre.

Além da radiação eletromagnética, o Sol (na região da corona) também libera um fluxo contínuo de partículas eletricamente carregadas: o vento solar que, como a radiação eletromagnética, traz energia para a Terra e, conseqüentemente, contribuiu para a formação da ionosfera. Enquanto a radiação eletromagnética viaja diretamente do Sol para a Terra em aproximadamente 8,3 minutos (pois viaja aproximadamente à velocidade da luz no vácuo), as partículas do vento solar chegam a Terra em aproximadamente 5 dias viajando com uma velocidade de cerca de 400 km/s. O vento solar é um fluxo de plasma solar ionizado que parte do campo magnético solar preenchendo o meio interplanetário. Ele é constituído de aproximadamente 50,9% de elétrons, 47,3% de prótons e 1,8% de He⁺². O vento solar origina-se nas regiões da corona onde as linhas do campo magnético são abertas fazendo com que o plasma coronal se expanda para o meio interplanetário formando o vento solar propriamente dito.

Fonte: Dal Poz (2005).

Como afirma Quadro e Fuentes (2004), a ionosfera pode ser entendida como um local de grande atividade elétrica e magnética, causando o aparecimento das auroras. Sua estrutura condiciona as variáveis temperatura, pressão, dilatação da superfície, dentre outras variáveis climáticas capazes de alterar o equilíbrio ambiental.

Na ionosfera ocorre também o fenômeno da Aurora Boreal (no Hemisfério Norte) ou Austral (no Hemisfério Sul). As auroras estão relacionadas com o vento solar, um fluxo de partículas carregadas, prótons e elétrons, emanadas do sol com alta energia. Quando estas partículas se aproximam da Terra, elas são capturadas pelo campo magnético da Terra. Sob a ação da força exercida pelo campo magnético sobre cargas em movimento, elas descrevem trajetórias espiraladas ao longo das linhas de indução do campo magnético terrestre, movendo-se para frente e para trás entre os pólos magnéticos sul e norte, onde são "refletidas" devido ao aumento do campo magnético. Estes elétrons e prótons aprisionados constituem os chamados "cinturões radioativos de Van Allen". Algumas partículas acompanham o campo magnético da Terra em direção aos pólos geomagnéticos, penetrando na ionosfera, onde colidem com átomos e moléculas de oxigênio e nitrogênio, que são temporariamente energizados. Quando elétrons, destes átomos e moléculas, retornam do seu estado energético excitado, eles emitem energia na forma de luz, o que constitui as auroras. As zonas de maior ocorrência das auroras situam-se em torno de 20-30° ao redor dos pólos geomagnéticos (76°N, 102°W; 68°S, 145°E). A atividade auroral varia com a atividade do sol.

Fonte: Quadro e Fuentes (2004).

A magnetosfera também é encontrada em outros corpos do sistema solar. Sondas espaciais (NASA Models, 2012) mostram a existência de campos magnéticos relativamente fortes em outros planetas. Eles podem gerar fluxos turbulentos nos núcleos planetários de material condutor, ou fracos, quando estes não possuem movimentos internos suficientes. A Tabela 2 mostra o campo magnético como uma das características próprias de cada planeta.

Os planetas Mercúrio, Vênus e Marte possuem o campo magnético muito fraco, e praticamente toda a radiação solar é freada pela atmosfera planetária (Teixeira *et al.*, 2009).

Tabela 2. Intensidades de campo magnético nos planetas do Sistema Solar comparados aos seus respectivos raios equatoriais e períodos de rotação. Fonte: Campbell (2003).

Planeta	Raio planetário (km)	Período de rotação (dias)	Campo Magnético Médio (nT)
Mercúrio	2.439	58,6	300
Vênus	6.051	243	<30
Terra	6.378	1	30.300
Marte	3.397	1,03	<60
Júpiter	71.492	0,41	428.000
Saturno	60.268	0,45	21.800
Urano	25.559	0,72	22.800
Netuno	24.746	0,67	13.300

Os planetas telúricos (Mercúrio, Vênus, Terra e Marte) possuem núcleos sólidos, constituído basicamente de Ferro em rotação e tamanho relativamente pequeno, além de um campo magnético fraco em relação ao da Terra. Já os planetas jovianos (Júpiter, Saturno, Urano e Netuno) são relativamente grandes, possuindo núcleos formados por Hidrogênio metálico (Hidrogênio em estado plasmático e sobre altíssimas pressões) e fortes campos magnéticos gerados por gás ionizado. A teoria aceita atualmente mostra que o campo magnético dipolar funciona como um dínamo eletromotor (Fig. 9A). O campo principal é produzido por correntes elétricas que circulam a partir do núcleo líquido da Terra, o qual acredita-se ser constituído principalmente por Ferro e Níquel (Lanza e Meloni, 2006). Correntes elétricas mantêm-se em movimento por partículas do núcleo líquido, gerando assim tanto as variações lentas como as inversões de polaridade do campo. Modelos matemáticos têm buscado uma explicação para as complexas correntes do interior do planeta (Fig. 9B), que seriam capazes de prever o comportamento do campo bipolar (Glatzmaier e Roberts, 1995).

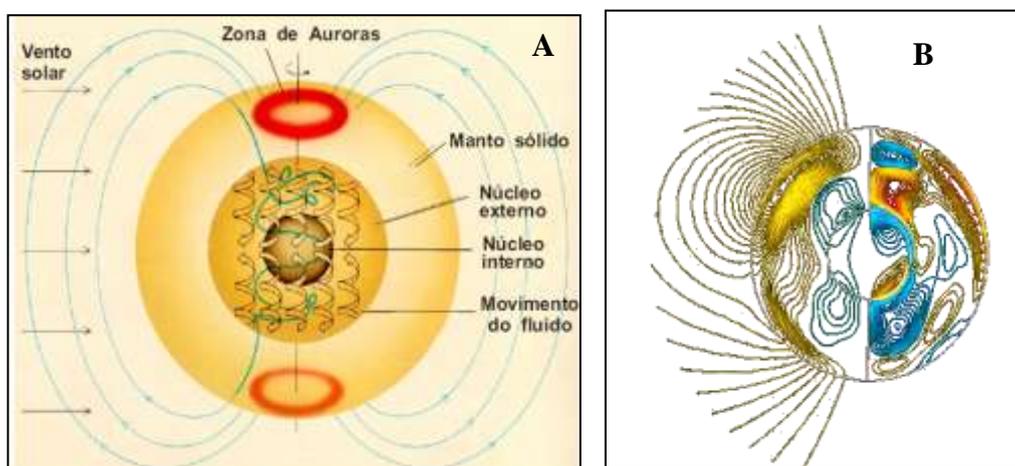


Fig. 9. Movimentos do núcleo da Terra produzem o campo magnético principal bipolar, capaz de influir sobre as condições ambientais de nosso planeta. Fonte: Teixeira *et al.* (2009) e Glatzmaier e Roberts (1995).

1.6 Variabilidade temporal e espacial do campo geomagnético

O campo magnético principal possui variações ao longo de eras geológicas, bem como possui variações rápidas diárias, além de modificações constantes em direção e sentido sobre a superfície terrestre. Estas alterações são utilizadas na Geofísica para investigação da crosta terrestre, bem como propor modelos de alterações futuras do campo.

1.6.1 Variações Rápidas

- **Variação diurna normal**

As variações diárias são de grande importância para levantamentos geofísicos de exploração. Estas variações foram descobertas pela primeira vez em 1722, na Inglaterra, quando também observou-se que essas variações diárias eram maiores no verão do que no inverno. Existem componentes de alta frequência na variação diurna, mas a tendência dominante é a de uma componente lenta, com período de 24 horas. Acredita-se serem causadas por correntes elétricas, induzidas na Terra, pela camada superior da ionosfera (Keary *et al*, 2002).

- **Tempestades geomagnéticas**

Chama-se de tempestades magnéticas, a oscilações em intensidade do campo (com limites próximos a 1000 nT), imprevisíveis, inconstantes, porém monitoráveis (Fig. 10). A frequência destas tempestades está ligada ao número de manchas solares e, conseqüentemente, aos ventos solares, por isso muitas delas podem ser previstas com certa antecedência. Sua duração vai de segundos a dias. Levantamentos magnéticos de exploração não devem ser realizados durante tempestades magnéticas, devido a dificuldades na aferição (Boyde, 2012; NOAA-Space Weather, 2013).

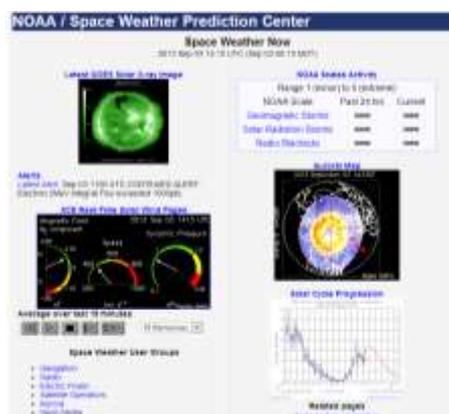


Fig. 10. Acompanhamento “on line” de tempestades geomagnéticas pela NOAA - Space Weather. As variações na intensidade e na direção do campo, podem ser visualizadas a cada 15 minutos por satélites em órbita. Fonte: NOAA-Space Weather (2013).

1.6.2 Variações Lentas

- **Variações Seculares**

As variações seculares trazem alterações de longo período (no mínimo anuais) tanto na direção quanto na intensidade do campo principal. A variação secular é claramente vista em dados geomagnéticos registrados por observatórios, quando plotados para vários anos (geralmente por médias anuais ou mensais) contra o tempo (Jackson *et al.*, 2000).

- **Deriva do Campo para Oeste**

As propriedades dipolares do campo terrestre foram determinadas pela primeira vez com precisão científica moderna por Gauss, usando o método matemático de análise por harmônicos esféricos, em 1839. Isto permitiu deduzir as características das variações globais do campo ao longo dos últimos 160 anos (Sabaka *et al.*, 2010). A análise da declinação magnética referente aos últimos séculos mostra um desvio do campo no sentido oeste do planeta, como pode ser observado na Figura 11.

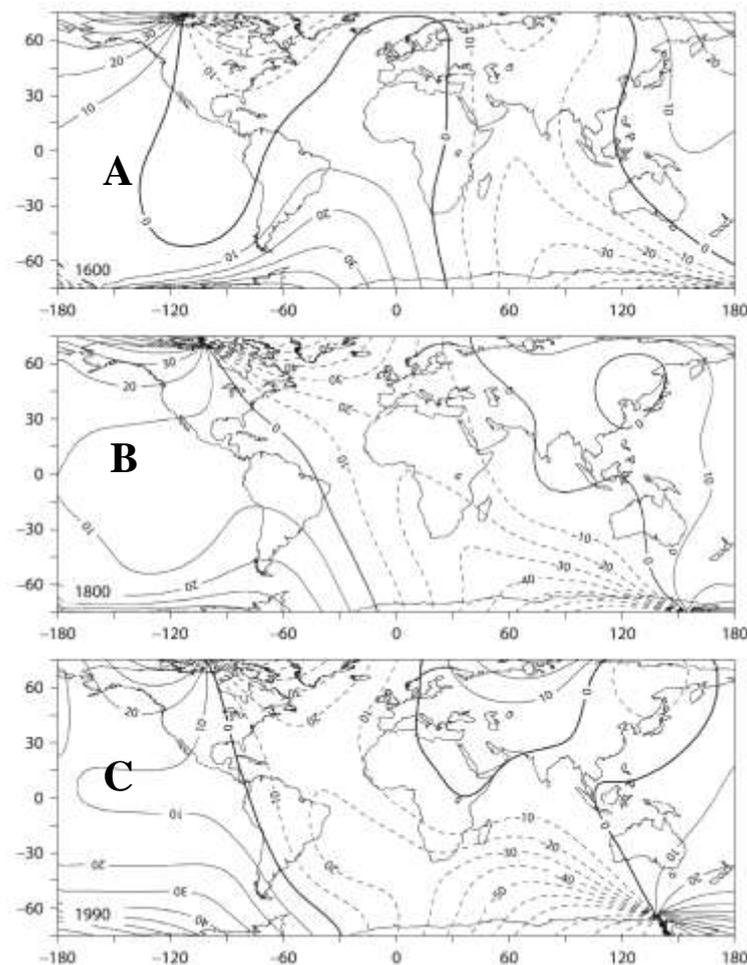


Fig. 11. Deriva global do campo geomagnético para oeste. Observa-se que a declinação de referência (zero) move-se para o oeste entre os períodos 1600 (A), 1800 (B) e 1990 (C), fruto da análise de registros históricos. Fonte: Jackson *et al.* (2000).

- **Excursão dos Polos Magnéticos em torno dos Polos Geográficos**

Observações da direção das linhas de campo mostram variações significativas entre a posição do norte magnético e do norte geográfico (Fig. 12). Barraclough (2000) realizou uma análise acerca desta variação, utilizando dados a partir de 1600, sendo estimado em $0,08^\circ$ por ano para Oeste, e de $0,01^\circ$ ao ano em latitude; porém os polos magnéticos e geográficos nunca ultrapassam 30 graus entre si. Milhares de anos se passam para completar um ciclo parcialmente repetitivo. Nos últimos 30 anos, o afastamento entre os polos praticamente dobrou.

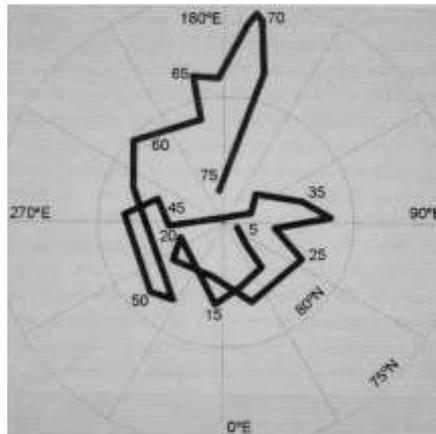


Fig. 12. Variação da posição do polo magnético Norte em torno do polo geográfico Norte, entre o período de 69 mil e 45,5 mil anos atrás, registrado em rochas. Fonte: Teixeira *et al.* (2009).

- **Inversões do Campo Magnético**

Observações históricas mostram um decaimento de cerca de 10% na intensidade do campo global, em 150 anos. Estas observações mostram uma possível inversão do campo global, como já ocorreu em outros momentos da história geológica da Terra (Fig. 13).

Estudos do Paleomagnetismo mostram que, em média, as inversões ocorrem a cada 220 mil anos, aproximadamente. A última inversão ocorreu a 760 mil anos, o que leva a crer, que uma inversão dos polos magnéticos terrestres está próxima de iniciar-se.

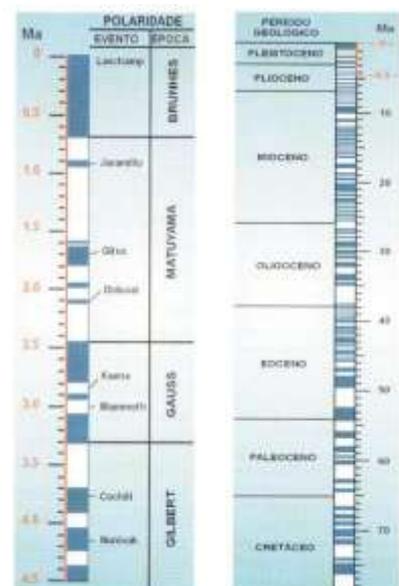


Fig. 13. Inversões do campo magnético principal terrestre ao longo das diversas eras geológicas. As faixas escuras representam polaridade igual a atual, enquanto faixas claras representam polaridade invertida. A escala da direita mostra as variações nos últimos 80 milhões de anos, enquanto a da esquerda mostra a variabilidade nos últimos 4,5 milhões. Fonte: Teixeira *et al.* (2009).

1.7 As componentes do campo magnético terrestre (CMT)

O CMT é uma grandeza matemática vetorial, sendo descrita por cinco componentes cartesianas e duas angulares (Keary *et al.*, 2002). Estas componentes podem ser distribuídas em dois grupos: os elementos lineares (X, Y, Z, H e F) e os elementos angulares (D e I), todos representados na Figura 14.

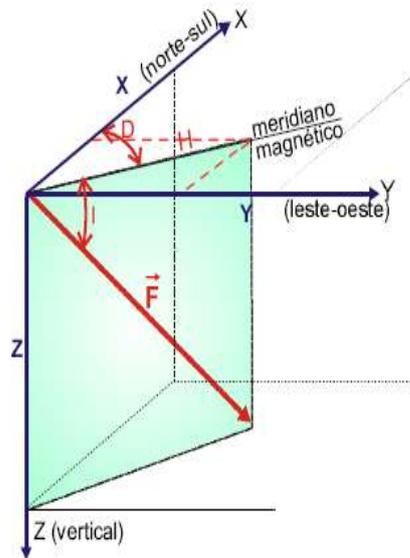


Fig. 14. Representação dos elementos matemáticos do campo magnético terrestre. Os elementos lineares: componente Norte-Sul (X), Leste-Oeste (Y), Vertical (Z), Horizontal (H) e Campo Total (F). Elementos angulares: Inclinação magnética (I) e declinação magnética (D). Fonte: Miranda (2004).

➤ **Elementos Lineares** (usualmente expressos em nanoTesla) :

- **Componente Magnética Norte (X):** mede a intensidade do campo na direção Norte-Sul, sendo positiva no sentido do norte geográfico, e negativa no sentido sul.
- **Componente Magnética Leste (Y):** mede a intensidade do campo na direção Leste-Oeste, sendo positiva no sentido do leste geográfico, e negativa no sentido oeste.
- **Componente Magnética Vertical (Z):** mede a intensidade do campo na direção vertical e perpendicular ao plano da superfície, sendo positiva no sentido local para baixo, e negativa no sentido local para cima.
- **Componente Magnética Horizontal (H):** mede a intensidade do campo na horizontal e paralela ao plano da superfície. Passa sobre o meridiano magnético local e localiza o norte magnético. É positiva no sentido do norte geográfico, e negativa no sentido sul.
- **Intensidade de Campo Total (F):** mede a intensidade vetorial total do campo em um determinado ponto da superfície.

➤ **Elementos Angulares** (usualmente expressos em graus) :

- **Declinação Magnética (D)**: é o ângulo entre a direção do Norte geográfico (dado pela componente X) e a direção da componente horizontal do campo magnético terrestre (dada pela componente H). É positiva quando medida do Norte para o Leste geográfico, e negativa quando do Norte para Oeste.
- **Inclinação Magnética (I)**: é o ângulo entre a componente magnética horizontal (H) e o vetor intensidade total do campo magnético (F). É positiva quando medida do plano horizontal local para baixo, e negativa para cima.

2 Relações matemáticas entre os sete elementos geomagnéticos

➤ Determinação de X, Y, Z e H em função de F, I e D.

$$X = F \cdot \text{sen } I \cdot \text{cos } D \quad \text{Equação (3)}$$

$$Y = F \cdot \text{sen } I \cdot \text{sen } D \quad \text{Equação (4)}$$

$$Z = F \cdot \text{sen } I \quad \text{Equação (5)}$$

$$H = (X^2 + Y^2)^{1/2} \quad \text{Equação (6)}$$

➤ Determinação de F, D e I, em função de X, Y, Z e H.

$$D = \text{arctg } (Y/X) \quad \text{Equação (7)}$$

$$I = \text{arctg } (Z/H) \quad \text{Equação (8)}$$

$$F = (X^2 + Y^2 + Z^2)^{1/2} \quad \text{Equação (9)}$$

➤ Outras relações entre os elementos geomagnéticos:

$$X = H \cdot \text{cos } D \quad \text{Equação (10)}$$

$$Y = H \cdot \text{sen } D \quad \text{Equação (11)}$$

$$Z = F \cdot \text{sen } I \quad \text{Equação (12)}$$

No presente trabalho será avaliada a distribuição do campo magnético referente à crosta terrestre, cuja variabilidade secular é desprezível (ocorre ao longo de anos e séculos) comparadas ao período de tempo dos deslocamentos de animais marinhos (medida em dias ou horas) (Langel e Hinze, 2011). Assim, movimentos geológicos de longo período, como os de placas tectônicas e blocos, que são medidos em milhões de anos, serão desprezados, dada a baixa variabilidade no período de tempo (Hemant e Maus, 2003; Hulot *et al.*, 2010).

A seguir, serão apresentados estudos comparativos entre o comportamento das tartarugas marinhas e o campo magnético. Estarão sendo relatados tanto os trabalhos de investigações realizadas em laboratório, com campos magnéticos artificiais, como aqueles de estudos a partir do campo natural, investigados nas últimas décadas.

CAPÍTULO 2

As tartarugas marinhas e o magnetismo terrestre

2.1 Introdução

As tartarugas marinhas pertencem a um dos grupos de animais mais antigos conhecidos, são capazes de percorrer longas distâncias em mar aberto, navegar por zonas de água tropical e subtropical, em todos os oceanos exceto o Ártico (Wyneken, 2001). Existem sete espécies viventes modernas em âmbito global que coexistem a cerca de 110 milhões de anos: A tartaruga-verde (*Chelonia mydas*), tartaruga-cabeçuda (*Caretta caretta*), tartaruga-de-pente (*Eretmochelys imbricata*), tartaruga-oliva (*Lepidochelys olivacea*), tartaruga-de-kemp (*Lepidochelys kempii*), tartaruga-de-couro (*Dermochelys coriacea*) e a *Natator depressus* (Spotila, 2004). A maior delas é a tartaruga-de-couro, que atinge até 2 metros de comprimento, chegando a pesar 600 Kg (Wyneken, 1997).

Ao atingirem a maturidade, em algumas décadas, as tartarugas fêmeas navegam por longas distâncias e desovam em praias específicas, o que é ainda um grande mistério biológico, já que a precisão ao retornar à estes mesmos locais, a cada 2 ou 3 anos, é notável (Wyneken *et al.*, 2007). Após depositar de 50 a 200 ovos na praia de desova, apenas 1 em cada 100 nascidos irão atingir a maturidade, o que tornam estas espécies altamente suscetíveis aos impactos ambientais. Como muitas destas espécies estão ameaçadas de extinção, existe um esforço da pesquisa internacional na investigação e determinação de seus mecanismos de navegação. O acompanhamento via satélite (Fig. 1) e a busca pelos principais fatores ambientais que influem em sua reprodução são temas abordados por investigadores tanto da área de biologia marinha, como oceanólogos das áreas de Física e Química (NOAA, 2007).



Fig. 1. Espécime de tartaruga-de-couro com transmissores via satélite. O acompanhamento destes animais é utilizado no monitoramento de hábitos alimentares, rotas migratórias e distribuição geográfica. Fonte: Lohmann *et al.* (2008).

2.2 Acompanhamento de tartarugas marinhas em movimentos oceânicos

A observação de tartarugas marinhas objetivando a compreensão de sua ecologia em mar aberto, é uma tarefa complexa. Deslocando-se por extensas áreas, sob condições climáticas adversas, ondas extremamente fortes e ação de predadores, estes animais têm sido acompanhados por etiquetagem, emissões por rádio e via satélite (Fig. 2). O que faz desta área uma das mais ativas na pesquisa científica de espécies ameaçadas de extinção em mar aberto. As sete espécies existentes têm sido monitoradas, sendo as tartarugas-verdes e de-couro as com maior número de registros de acompanhamentos (Eckert e Beggs, 2006).



Fig. 2. Tartaruga-de-couro (*Dermochelys coriacea*) recebendo marcação (tagging) durante postura, para registro e acompanhamento por telemetria via satélite. Foto: Turtugaruba Foundation – Aruba (2006).

A marcação de tartarugas marinhas fornece informações sobre tendências de crescimento ou decréscimo das populações, locais de habitat e de nidificação, além de padrões de migrações, taxas de crescimento individual, história de migrações anteriores e frequência de nidificação. Observa-se também as taxas de encalhe dos animais, fazendo com que as condições de reprodução possam ser melhoradas (Schroeder e Murphy, 1999; Gerrodette e Taylor, 1999). Entre as principais formas de marcação (Fig. 3) destacam-se as etiquetas presas às nadadeiras (Flipper Taggs) e os registros de deslocamentos por ondas eletromagnéticas (microondas ou satélite), a seguir descritos.

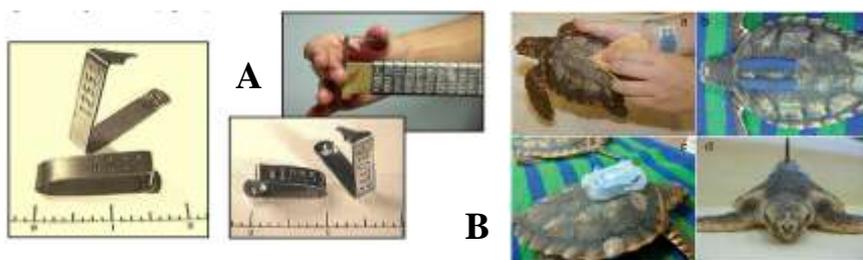


Fig. 3. Etiquetas de metal (Flipper taggs - A) utilizadas na marcação e colocação de transmissores de telemetria por micro-ondas (B) em tartarugas-verdes (*Chelonia mydas*) juvenís. Fonte: Eckert e Beggs (2006).

- Etiquetagem em nadadeiras (Flipper tagging): São utilizadas para monitoramento de animais em deslocamento ou alimentação, contendo uma numeração formada por três letras e três números, aplicadas por compressão (Fig. 4). Estas marcações podem permanecer até 10 anos no animal, acompanhadas através de sucessivas recapturas.



Fig. 4. Aplicação de marcação com etiquetas em tartarugas marinhas. As nadadeiras são escolhidas como ponto de aplicação. Foto: NMFS/SEFSC (2008).

- Marcação PIT (Passive Integrated Transponder): São pequenos processadores passivos, inertes e selados em vidro, que transmitem informações a um leitor portátil (Fig. 5A). Quando o leitor passa perto da marca, é ativado com um sinal de rádio de baixa frequência, e o número de identificação associado com a marcação é transmitido para o leitor. Marcas PIT são inseridas nos músculos do animal e recuperadas em cerca de um ano.
- Marcação por satélite, rádio ou marcação acústica: Transmissores por satélite e rádio são utilizados para acompanhar movimentos de tartarugas marinhas em alto mar. As transmissões por satélite e acústicas são recebidas quando os animais sobem à superfície para respirar, sendo os transmissores afixados no casco com Epoxi ou através de cinturões (Fig. 5B). Transmissões assim são temporárias, mas capazes de acompanhar em tempo real (dependendo das condições climáticas) o movimento oceânico destes animais (VIMS, 2013).

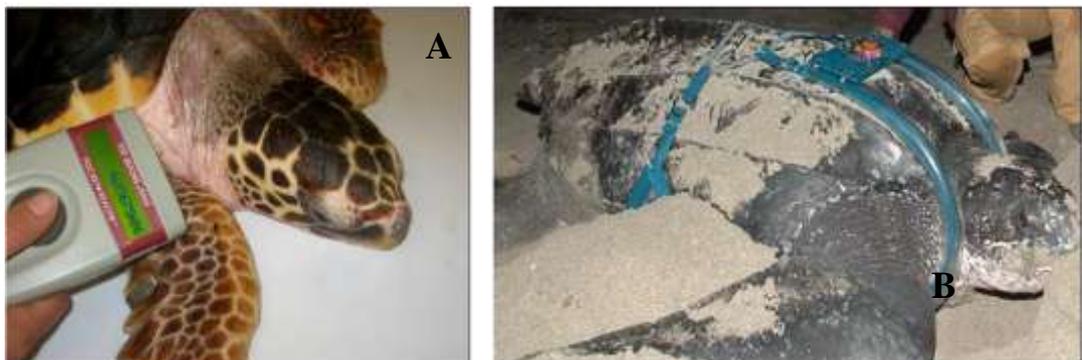


Fig. 5. Aplicação de marcações por ondas eletromagnéticas em tartarugas marinhas, utilizando microndas (A) ou sinal de satélite (B) com envoltura protetora. Foto: NMFS/SEFSC (2008).

2.3 A magnetopercepção em tartarugas marinhas

Evidências já foram apresentadas quanto à capacidade de algumas espécies marinhas terem percepção ao magnetismo (Johnsen e Lohmann, 2008; Lohmann *et al.*, 2007). Os principais indícios são de análises realizadas em laboratório, onde campos magnéticos são produzidos de forma controlada e o comportamento dos animais avaliado. Lohmann (2010) relata alterações, em certas condições, da orientação em pombos-correio e tartarugas marinhas, quando barras de imãs são implantadas nestes dois animais. Algumas propriedades nas atividades neurológicas destes animais são alteradas quando passam por mudanças das condições normais do ambiente a que são expostos. O referido pesquisador relatou suas descobertas quanto às possíveis informações que um animal é capaz de obter a partir da detecção do campo magnético: a direção Norte-Sul magnética (Fig. 6A) como uma “bússola biológica”. Ele registrou a direção do movimento migratório mais comum, ou a localização espacial através de “pistas geomagnéticas”, possivelmente registradas em polarizações magnéticas (Fig. 6B) incorporados à biologia do animal.

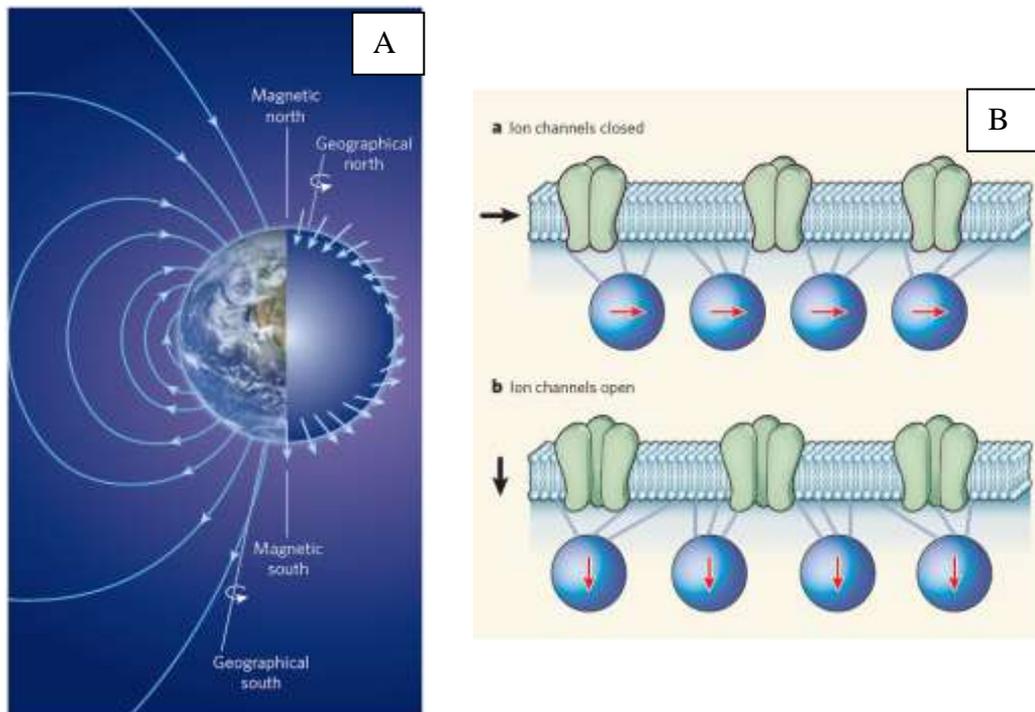


Fig. 6. Possíveis formas de uso do campo magnético por tartarugas marinhas. Modelo de orientação pelo polo magnético terrestre e não o geográfico (A) ou pela possível incorporação de cristais de magnetita às estruturas biológicas (B) através da formação de cristais superparamagnéticos (esferas azuis em B). Estas hipóteses são respaldadas por alterações de comportamento de certas espécies de tartarugas marinhas. Fonte: Lohmann (2010).

As sete espécies de tartarugas marinhas existentes possuem constantes e regulares movimentações migratórias, o que as colocam diante de ambientes de alimentação bem diversos (Fig. 7). Por isso, acredita-se não ser a alimentação (em geral medusas, camarões, esponjas e águas-vivas, variando a cada espécie), nem a necessidade de desova (nas praias em que nasceram), as únicas razões pelas quais estas migrações são realizadas em tão extensas regiões. Durante as migrações, estes animais estão sujeitos a ambientes biológicos diversos, e alterações antrópicas nos oceanos são capazes de influir em sua sobrevivência. A proibição de sua captura em muitas regiões melhorou os níveis de sobrevivência desde a década de 1970. Porém, fortes alterações ambientais, como o aumento na acidez das águas, excesso de navios cargueiros e de pesca, e até mesmo a produção de campos magnéticos não naturais, são levados em conta na avaliação do atual estado de ameaças às tartarugas marinhas. A magnetosensibilidade talvez possa tornar-se, no futuro, uma forma de investigação científica dos impactos sobre esta espécie (National Research Council, 1990; Bolton e Witherington, 2003; Gulko e Eckert, 2003; Lutz, *et al.*, 2003).



Fig. 7. Tartaruga marinha verde (*Chelonia mydas*). Muitas espécies estão ameaçadas por alterações ambientais tais como poluição das águas, impactos sonoros provocados por navios, temperatura dos oceanos. A percepção magnética pode ser um fator de registro dos impactos ambientais eletromagnéticos antrópicos. Fonte: NOAA (2012).

Lohmann *et al.* (2008), analisando direções assumidas por animais em laboratório ao sofrerem a indução de campos magnéticos, observou que filhotes de tartarugas-cabeçudas (*Caretta caretta*) possuem preferências por direcionamentos. Ao colocar as condições geomagnéticas de três posições geográficas diferentes (Fig. 8), os animais (em média) orientaram-se conforme a direção das principais correntes oceânicas do Golfo do México. Isto leva à hipótese de que registros internos, na biologia do animal, podem estar gerando um mecanismo de orientação geográfica adequada às correntes oceânicas, semelhante a um “mapa magnético” biológico.

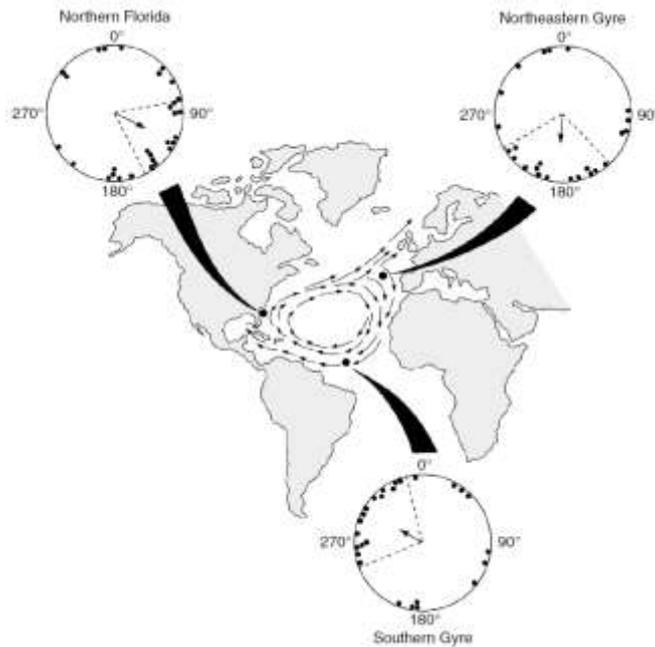


Fig. 8. Experimento de Lohmann (2008), realizado em 2001. Jovens tartarugas-cabeçudas (*Caretta caretta*) foram sujeitas à campos magnéticos semelhantes aos campos geomagnéticos de três pontos diferentes do Oceano Atlântico. Elas orientaram-se conforme a direção e sentido da corrente marinha do Golfo do México, que as impulsiona na movimentação oceânica. Isto indica a possibilidade da existência de mapas magnéticos nos animais. Fonte: Lohmann *et al.* (2008).

Sale e Luschi (2009) relatam a importância de correntes oceânicas (Fig. 9) nas migrações de tartarugas-de-couro (*Dermochelys coriacea*). Os pesquisadores avaliaram que, nestas migrações, existem influências de correntes de deriva (registradas por boias próximas à costa da África) capazes de alterar as rotas de destino destes animais. Porém, estes desvios naturais foram superados e alcançaram os alvos, provavelmente utilizando marcadores ao longo do trajeto. Portanto, sugeriu-se uma combinação de fatores (correntes, temperatura, magnetismo) que, de forma conjunta, podem explicar o sucesso na orientação das tartarugas.

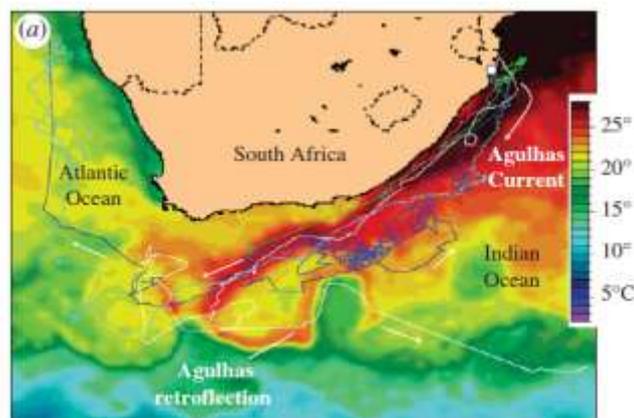


Fig. 9. Movimentação de tartarugas-de-couro (*Dermochelys coriacea*) na costa africana. Correntes de deriva atrapalham a movimentação oceânica destes animais, porém mecanismos ligados à direção das correntes, temperatura e magnetopercepção podem estar colaborando conjuntamente na orientação animal. Fonte: Sale e Luschi (2009).

Akesson *et al.* (2003) relatam a extraordinária capacidade das tartarugas-verdes (*Chelonia mydas*) de percorrerem mais de 2000 km da costa brasileira até a Ilha de Ascensão e encontrarem os locais de nidificação com extrema precisão (Fig. 10). O estudo mostrou que dentre as estratégias para alcançar êxito, pistas relacionadas a correntes oceânicas, pistas geomagnéticas e até orientação da posição do Sol no horizonte, são possíveis para estas orientações. Deste modo, concluiu-se que os espécimes não utilizam informações químicas transportadas por correntes, nem informações geomagnéticas do campo principal, tais como declinação e intensidade de campo, estando ligadas, possivelmente, a pistas transportadas por ventos, porém apenas nas proximidades da Ilha e não em regiões de mar aberto, onde a maior parte do percurso é realizado.

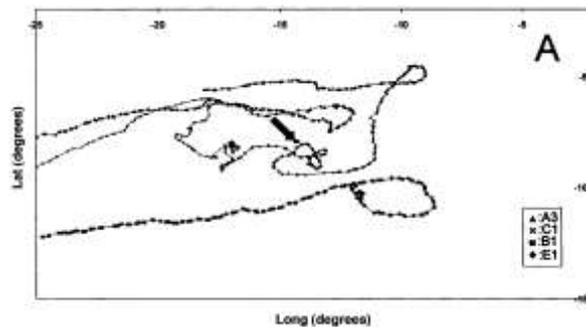


Fig. 10. Movimento de tartarugas-verdes (*Chelonia mydas*) nas proximidades da Ilha de Ascensão no Oceano Atlântico. Indicativos mostram que informações químicas transportadas pelo vento podem servir de pistas para o animal encontrar o local de nidificação, somente nas proximidades da Ilha. O campo magnético principal terrestre não sofre alterações substanciais que sirvam de indicativo. Fonte: Akensson *et al.* (2003).

Avens (2003) relata experimentos com espécimes de tartarugas-cabeçudas e verdes jovens (com os mecanismos de orientação ainda em desenvolvimento), onde são alteradas as interferências visuais e magnéticas. A pesquisadora adicionou obstruções visuais a alguns animais e imãs em outros, verificando que estes animais perdem o sentido de orientação quando os dois indicativos (visão e percepção magnética) são obstruídos (Fig. 11), o que leva a crer que a capacidade de orientação pode estar presa a mais de um fator. Os animais pesquisados usam uma ou outra forma de percepção sensorial, conforme o disponível.

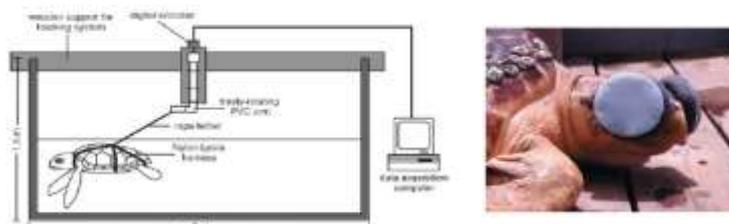


Fig. 11. Experimento realizado em laboratório com tartarugas juvenis das espécies cabeçuda e verde. Os animais tiveram orientações diferentes quando retiradas as pistas visuais e magnéticas. Fonte: Avens (2003).

2.4 Monitoramento de tartarugas marinhas por telemetria

Desde a década de 1990, inúmeros trabalhos têm realizado o acompanhamento de tartarugas marinhas em suas movimentações tanto por águas litorâneas como em alto mar, sejam avaliando as regiões mais prováveis de desova, regiões de alimentação, e a ação de predadores, como também relacionando a navegabilidade em longas distâncias e aos fatores ambientais influentes. Os métodos de acompanhamento podem variar, indo desde a identificação da posição relativa por boias oceânicas, até por satélite, onde o sistema ARGOS (Argus System, 2012) é o mais utilizado (Fig. 12).



Fig. 12. Tartaruga marinha com marcadores (tagging) no casco pelo sistema ARGOS. Os transmissores são afixados nos animais e os sinais acompanhados via satélite. Fonte: Argos System (2012).

Papi *et al.* (2000) acompanhou um grupo de tartarugas da Ilha de Ascensão, no Atlântico Sul, até as praias do Brasil por cerca de 2000 km, sendo registrados os trajetos de animais-controle e de outros com interferências magnéticas artificiais (ímãs) instaladas sobre a carapaça (Fig. 13). Os pesquisadores verificaram que os trajetos de retorno da postura de ovos para o Brasil não sofreram alterações. Tudo indicou que o campo geomagnético (muito mais fraco que o dos ímãs instalados) não seria determinante para a escolha de rotas bem sucedidas. Porém, deve-se ressaltar que isto não invalida a possível existência de um mecanismo biológico interno, que utilize pequenas variações de campo crustal, já que os ímãs instalados são fortes, mas possuem intensidades constantes no tempo.

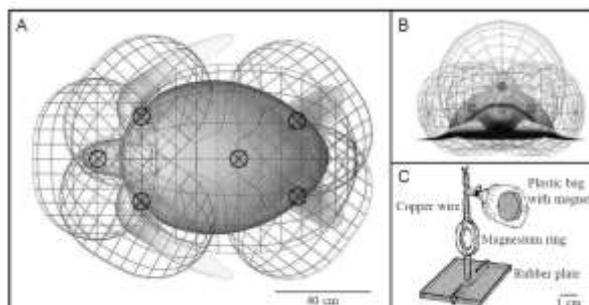


Fig. 13. Posicionamento de ímãs em carapaças de tartarugas-verdes que retornavam de postura da Ilha de Ascensão, no Atlântico Sul. As intensidades dos ímãs não interferiram nas rotas. Fonte: Papi *et al.* (2000).

Seminoff *et al.* (2008) acompanharam a saída de 12 espécimes de tartarugas-verdes das Ilhas Galápagos (identificados por círculos na Fig. 14), avaliando as interferências da temperatura da superfície do mar, níveis de clorofila, anomalias de altura de ondas e correntes oceânicas. Os pesquisadores verificaram que existem corredores de migração destes animais, porém nenhum deles está relacionado de forma direta às alterações das componentes físicas e oceanográficas usuais analisadas.

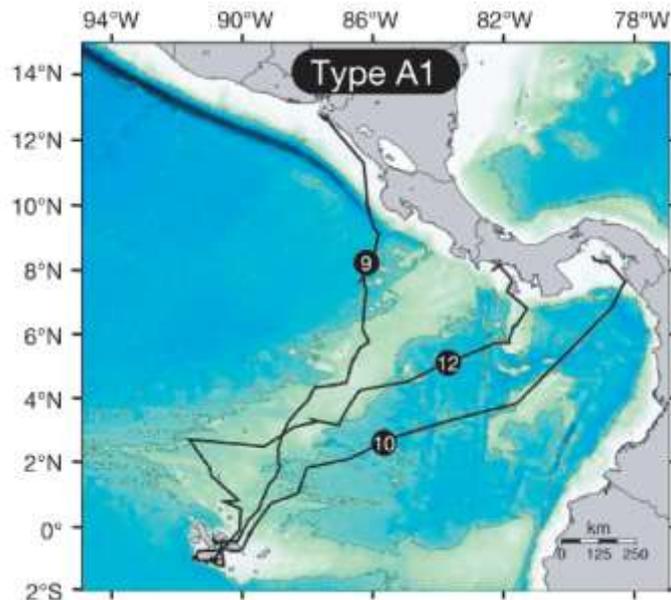


Fig. 14. Tartarugas-verdes (linhas pretas) retornando da desova no Arquipélago de Galápagos (Equador). Apesar de existirem grupos de animais formando uma espécie de corredor, eles não dependem diretamente de variáveis usuais oceanográficas, tais como temperatura, correntes, altura de onda e níveis de clorofila. Fonte: Seminoff (2008).

Godley *et al.* (2003) fixaram transmissores (ST-18 e ST-6), tipo Platform Terminal Transmitters (PTTs) via satélite em 10 espécimes de tartarugas-verdes (*Chelonia mydas*) na costa africana, em 2001 (Fig. 15), identificando suas posições geográficas. O posicionamento indicou regiões mais comuns de migração destes animais, e assim, foi realizada uma demarcação de áreas de preservação desta espécie.



Fig. 15. Trajeto migratório (linha vermelha) de um espécime de tartaruga verde deixando Poilão, na Guiné Bissau, até o Parque Nacional do Banc d'Arguin, na Mauritânia. Dados como estes identificam as regiões de proteção à espécie. Fonte: Godley *et al.* (2003).

Cheng (2000), utilizando transmissores do sistema de telemetria ARGOS (Argos System, 2012), acompanharam seis tartarugas-verdes que deixavam as zonas de nidificação em Wan-An (Fig. 16), Arquipélago de Penghu, no estreito de Taiwan. Verificou-se que, mesmo passando por regiões de muita turbulência oceânica, registrada através das variações de velocidade dos espécimes, o senso de orientação animal não foi alterado, assim como não foi dependente das velocidades em cada trecho.

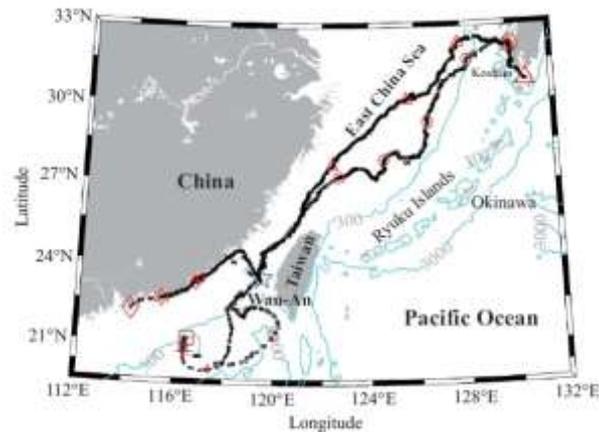


Fig. 16. Registro do corredor de migração de tartarugas-verdes (linha preta), no estreito de Taiwan. Mesmo com velocidades alteradas no percurso, devido às fortes correntes, os espécimes conseguiram completar o percurso com muita precisão. Fonte: Cheng (2000).

Estudos realizados por Boström *et al.* (2012) mostram que a capacidade de navegação das tartarugas marinhas é incontestável pelos resultados científicos já apresentados, e se pode relaciona-los a duas componentes do campo magnético bipolar. Os pesquisadores argumentam que as posições bi-coordenadas (Fig. 17) destes animais possuem duplicidade, ou seja, duas coordenadas geomagnéticas podem não ser suficientes para pré-definir um trajeto. Concluindo ser improvável que o campo magnético principal seja, sozinho, suficiente para orientação de todo um trajeto oceânico.

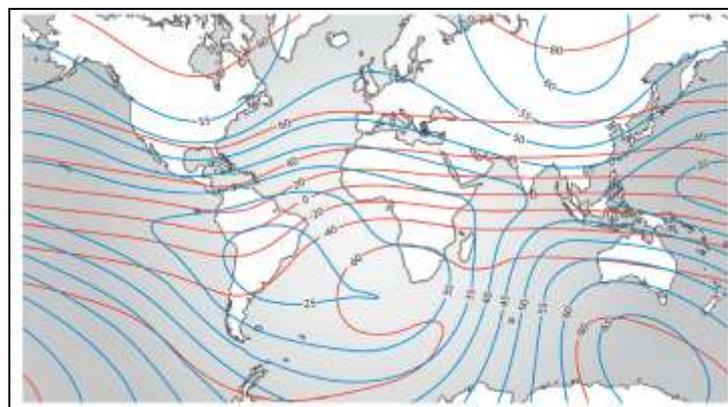


Fig. 17. Isolinhas do campo geomagnético principal. A intensidade do campo total em azul (em nT) e a inclinação magnética em vermelho (expressa em graus), em projeção Mercator. Fonte: Boström *et al.* (2012).

Pode-se observar que os diversos trabalhos acerca da relação entre o campo magnético terrestre e os movimentos em larga escala de tartarugas marinhas não são conclusivos. O que mostra ser a navegabilidade animal formada por um conjunto complexo de fatores, capazes de ser influenciada pelo meio ambiente.

Em todos os trabalhos aqui apresentados, foram feitas análises do comportamento animal perante a influência do campo magnético principal, tanto em intensidade (nT) quanto em direção (graus). A escolha do campo principal por estes autores, justifica-se por ser o campo mais intenso e, assim, espera-se ser o mais influente. O presente trabalho argumenta haver uma variabilidade maior no campo da crosta e não no campo principal, já que enquanto o primeiro varia na faixa de centenas de nT, o segundo varia na faixa de milhares de nT. Assim, existe a possibilidade de haver um mecanismo interno nestes animais capaz de detectar a variação descontínua, e não a relativa continuidade do campo principal; ou existe algum mecanismo que se perturbe com as sucessivas variações do campo.

O presente trabalho propõe uma avaliação diferente das já realizadas (metodologia a ser apresentada Capítulo 3), pois busca estabelecer um comparativo entre a movimentação de tartarugas marinhas e a contribuição magnética dada pela crosta oceânica, e não pelo campo magnético principal.

CAPÍTULO 3

Métodos

3.1 Modelos geomagnéticos mundiais

Para a descrição da intensidade e da direção do campo geomagnético nas regiões oceânicas do presente estudo, foram utilizados modelos matemáticos a nível global, que incorporam variações seculares, interferências locais e variabilidade temporal. Estes modelos matemáticos são atualizados a cada cinco anos e incorporam variações registradas por medidas geofísicas presenciais, por satélites (CHAMP, 2012; ORSTED, 2012), bem como aeromagnéticas. Através da utilização de softwares específicos de modelos globais, foram produzidas tabelas contendo as componentes do campo geomagnético em função da latitude, longitude, altitude e período de tempo. Estes modelos são descritos a seguir.

3.1.1 Modelo Magnético Mundial (WMM)

(World Magnetic Model)

O Modelo Magnético Mundial (WMM, 2010) foi desenvolvido por The United States National Geospatial-Intelligence Agency (NGA-USA), através de The U.S. National Geophysical Data Center (NGDC-USA) e pelo United Kingdom's Defence Geographic Centre (DGC-UK), do British Geological Survey (BGS-UK). O Modelo WMM é utilizado pelos departamentos de defesa dos Estados Unidos e da Grã-Bretanha, além de ser o padrão para a NATO (North Atlantic Treaty Organization-Organização do Tratado do Atlântico Norte, OTAN), mecanismo de defesa militar a nível mundial. O modelo atual para a descrição do CMT está na versão WMM2010, sendo destinado ao período de tempo entre 2010 e 2015, com a inclusão de dados já consolidados de 1900 a 2010.

Neste modelo, o campo resultante $\mathbf{B}(r,t)$, é função do raio da Terra (r) e tempo (t). Provém da análise de uma série de dados por observatórios magnéticos distribuídos pelo mundo, de satélite, de medidas aeromagnéticas e de estações terrestres e oceânicas, sendo descritos como a soma de três contribuições:

$$\mathbf{B}(r,t) = \mathbf{B}_m(r,t) + \mathbf{B}_c(r) + \mathbf{B}_d(r,t) \quad \text{Equação (1)}$$

$\mathbf{B}_m(r,t)$ é a parte principal do campo, correspondendo a 95% do campo gerado sobre a superfície da Terra, $\mathbf{B}_c(r)$ é a variação secular, que possui oscilações muito pequenas para o período de 5 anos do modelo, e $\mathbf{B}_d(r,t)$ indica a componente relacionada às induções sobre a

crosta e o manto, causadas pela ação da magnetosfera e da ionosfera. O modelo determina os sete elementos geomagnéticos numa faixa cujas intensidades máximas e mínimas são dadas pela Tabela 1.

Tabela 1. Identificação, intensidades máxima, mínimas e unidades físicas dos elementos geomagnéticos do campo principal pelo modelo WMM2010. Fonte: WMM (2010).

Elemento Geomagnético	Nome	Nome alternativo	Mínimo	Máximo	Unidade
X	Componente Norte	Intensidade Norte	-17.000	+42.000	nT
Y	Componente Leste	Intensidade Leste	-18.000	+18.000	nT
Z	Componente Vertical	Intensidade Vertical	-67.000	+67.000	nT
H	Intensidade Horizontal	x	0	+42.000	nT
F	Intensidade Total	Campo Total	+22.000	+67.000	nT
I	Inclinação	Desvio Magnético	-90	+90	Grau
D	Declinação	Variação Magnética	-180	+180	Grau

O modelo fornece dados através de softwares matemáticos contendo o desenvolvimento em série, com índices de variação obtidos experimentalmente. São eles:

- Software **wmm_point.c**: construído em linguagem C⁺⁺, determina, por desenvolvimento computacional numérico, a intensidade dos sete parâmetros do campo magnético principal (X, Y, Z, F, D e I) para um determinado ponto sobre o globo terrestre. As variáveis introduzidas são a latitude, a longitude, a altitude (baseado no nível médio do mar ou elipsóide de referência WGS-84), além da data em formato decimal.
- Software **wmm_grid.c**: em linguagem C⁺⁺, determina a intensidade das sete componentes do campo magnético principal (X, Y, Z, F, D e I), para uma determinada área delimitada do globo terrestre. As variáveis introduzidas são os limites superiores e inferiores de latitude, de longitude, de altitude (baseado no nível médio do mar ou elipsóide de referência WGS-84), além da data em formato decimal.

Os softwares respectivos estão disponíveis para pesquisadores em formato digital no site <<http://www.ngdc.noaa.gov/geomag/WMM/DoDWMM.shtml>>. A sua distribuição ao longo de todo o globo é apresentada na Figura 1, onde pode-se observar o software **wmm_grid.c** para a determinação da intensidade de cada uma das componentes do campo principal, expressa em projeção ortogonal Mercator. Os limites desta projeção é de 70° S a 70° N de latitude, e 180° E a 180° W de longitude, sendo a altitude projetada a do nível médio do mar (WMM, 2010).

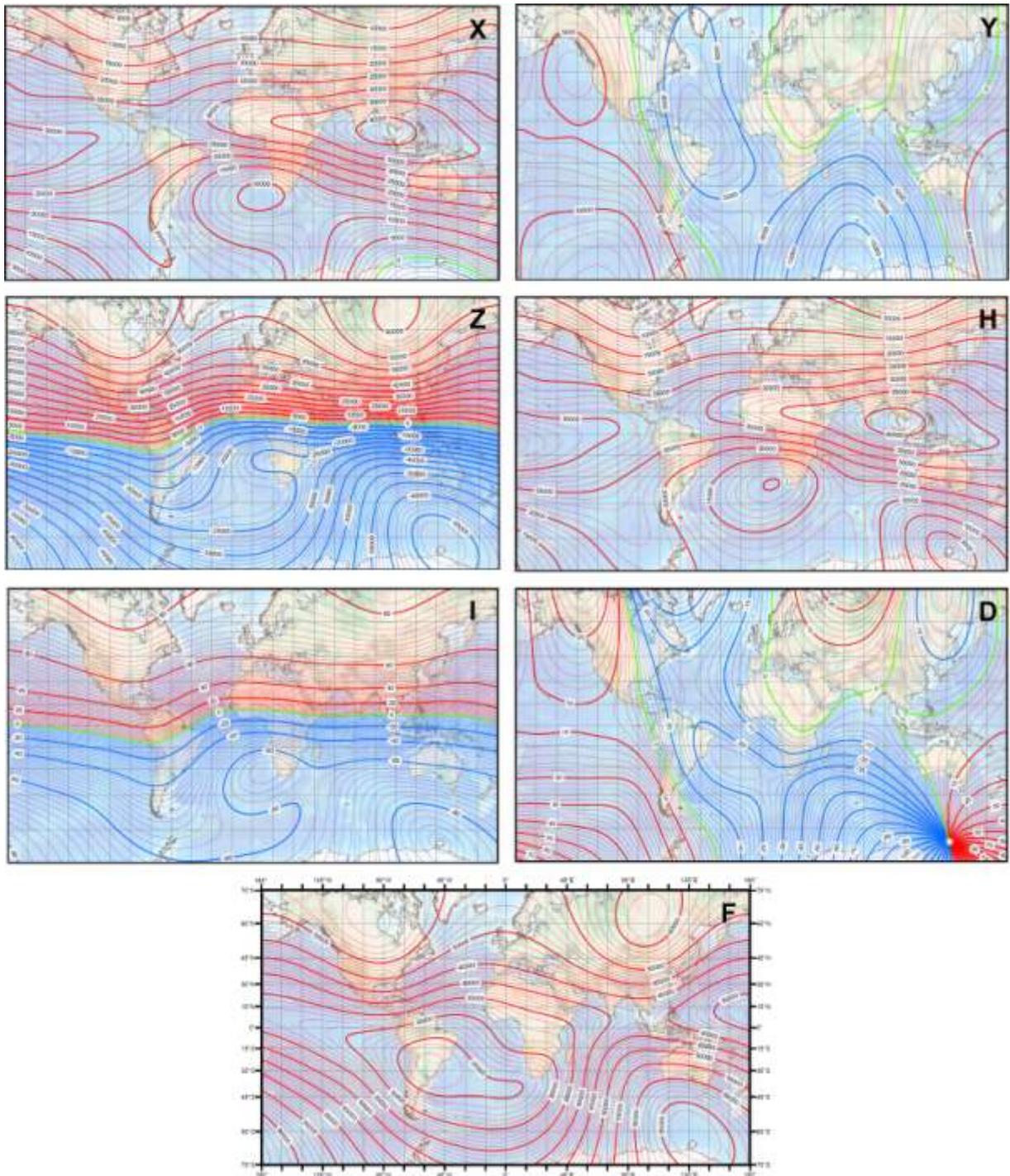


Fig. 1. Distribuição mundial dos sete elementos magnéticos do campo principal pelo modelo WMM2010. Os elementos escalares de campo estão dispostos em contornos de 1000 nT e os angulares em contornos de 2 graus, todos em projeção Mercator. Intensidade Norte (X), Intensidade Leste (Y), Intensidade Vertical (Z), Intensidade Horizontal (H), Inclinação Magnética (I), Declinação Magnética (D) e Intensidade Total (F). Fonte: WMM (2010).

Os softwares utilizam índices de variação relativos aos cinco anos de validade do modelo, fornecendo uma resolução de 0,1 nT para os elementos lineares e 0,01 graus para os angulares, limitado a altitudes entre 1 km abaixo do nível do mar e 300 km acima. Com o software `wmm_point` (Fig. 2A) determina-se a intensidades das componentes do campo

principal para um determinado ponto do globo, em determinado instante do tempo. Com o software `wmm_grid` (Fig. 2B) gera-se uma tabela contendo a intensidade de cada elemento geomagnético para uma área geográfica pré-definida. Além das coordenadas de posição e tempo, introduz-se também o grau de passo (*step size*), limitado a um mínimo de 0,01 grau e 1,0 no máximo entre as posições geradas, possibilitando, assim, uma distribuição em forma de grade (grid). O modelo matemático, juntamente com os softwares, estão disponibilizados pela NOAA-NGDC em < <http://www.ngdc.noaa.gov/geomag/WMM/DoDWMM.shtml>>.

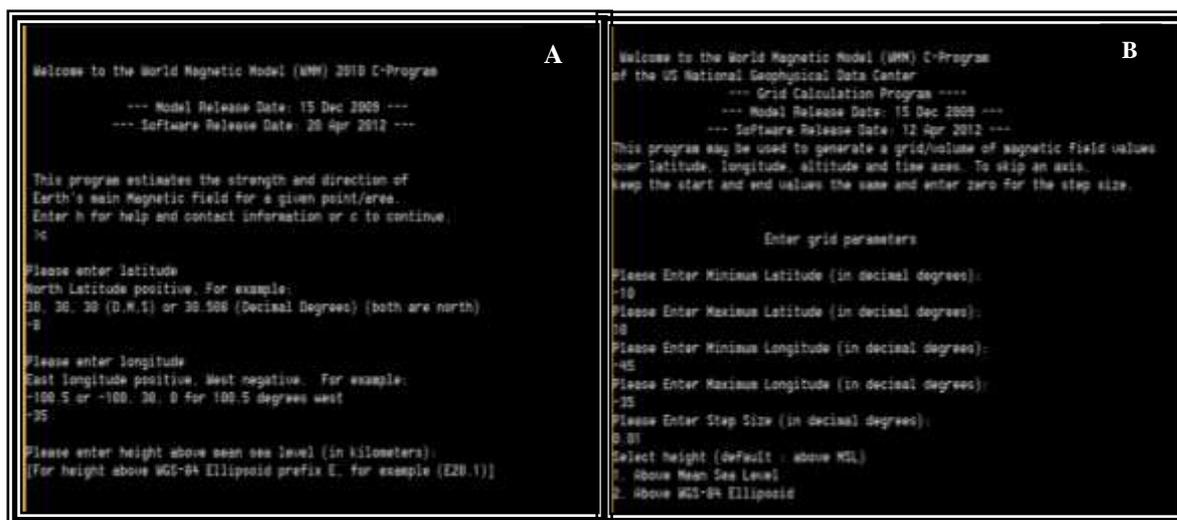


Fig. 2. Imagem de tela inicial dos softwares `wmm_point` (A) e `wmm_grid` (B) em processamento. Os dados introduzidos de posição geográfica, altitude e data geram a intensidade dos sete elementos do campo principal geomagnético pelo modelo WMM2010. Fonte: WMM (2010).

3.1.2 Modelo do Campo Magnético Ampliado (EMM) (Enhanced Magnetic Model)

É conhecido que o campo na superfície da Terra seja formado principalmente pela sobreposição de duas partes principais e estáveis: o campo produzido pelo geodínamo do núcleo externo em forma líquida (campo principal), e o campo produzido por rochas magnetizadas da crosta (campo crustal). Na superfície predomina o campo principal, originado em profundidades maiores que 2500 km, já em baixas profundidades ele sofre influência do campo crustal. O modelo EMM determina o campo principal acrescido da influência da crosta terrestre, possuindo a mesma precisão do modelo WMM. Enquanto o modelo WMM utiliza um desenvolvimento numérico em harmônicos esféricos de ordem 13, o modelo EMM utiliza a ordem 720, o que amplia sua resolução a 56 km de profundidade. Este

aumento de resolução contribui com a precisão na avaliação de anomalias magnéticas próximas à superfície. A versão EMM2010 construída é válida para o período 2000-2015 e foi compilada por medidas de satélite, por navios oceanográficos de pesquisa geofísica, levantamentos aeromagnéticos e estações geomagnéticas em terra.

A lista completa de contribuidores ao modelo está disponível em:

<http://www.ngdc.noaa.gov/geomag/EMM/emm_acknowledge.shtml>.

O modelo EMM2010, juntamente com os softwares matemáticos, está disponível em:

<<http://www.ngdc.noaa.gov/geomag/EMM/index.html>>.

Dois softwares são disponibilizados (Fig. 3) em linguagem C++, para obtenção de intensidades pontuais e de grades, para posterior plotagem em forma de superfícies equipotenciais.

- Software **emm_sph_point_windows**: construído em linguagem C++, o software calcula a intensidade do campo ampliado para um determinado ponto sobre a superfície terrestre. São introduzidas as coordenadas geográficas de latitude, longitude, altitude em relação ao nível do mar e data em decimais.
- Software **emm_sph_grid_windows**: construído em linguagem C++, este software determina a intensidade de cada elemento geomagnético para uma área pré-definida. Introduce-se os limites superiores e inferiores de latitude e longitude, além da altitude em relação ao nível médio do mar e a data em decimal.

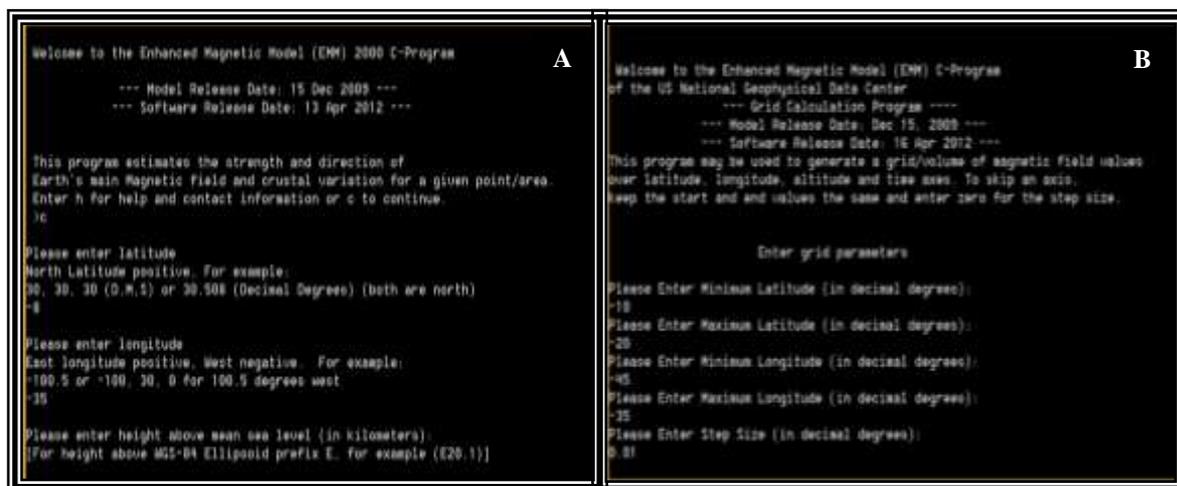


Fig. 3. Imagem de tela inicial dos softwares emm_sph_point_windows(A) e emm_sph_grid_windows (B) em processamento. Os dados de posição geográfica, altitude e ano identificam a intensidade dos sete elementos do campo geomagnético ampliado pelo modelo EMM2010.

3.2 Softwares utilizados no tratamento de dados geomagnéticos

➤ Golden Software SURFER11

SURFER11 (Golden Software, 2012) é um pacote de softwares para Windows destinado à produção de mapas (base, de contorno, de relevo e vetoriais). A distribuição do campo geomagnético é feita por interpolação de dados em forma de grade (*grid*), além da manipulação de tabelas e projeções 2D e 3D.

As diversas ferramentas deste software (Fig. 4) permitem a distribuição e a avaliação das variantes geomagnéticas em formato de projeção ortogonal Mercator, possibilitando uma visualização detalhada em coordenadas geográficas do oceano.

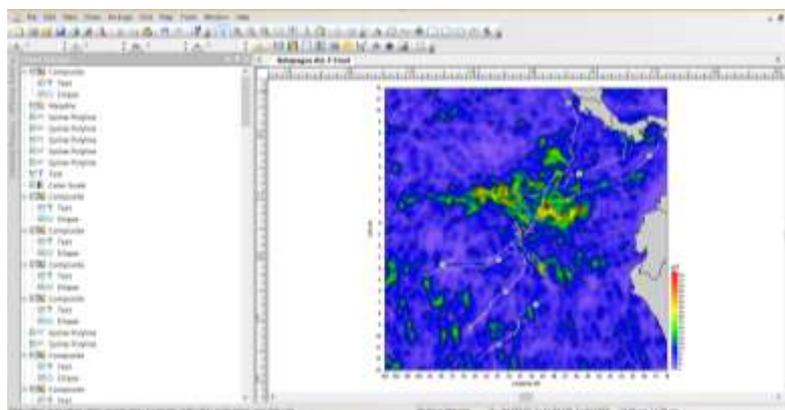


Fig. 4. Software SURFER11 em processamento de mapas da distribuição do campo magnético referente a uma região oceânica delimitada. As ferramentas de processamento por imagens são capazes de identificar as regiões de maior e menor variabilidade do campo. Fonte: Golden Software (2012).

➤ Golden Software VOXLER3

Programa utilizado para a construção de projeções 3D interativas dos dados geomagnéticos. Além de personalizar a distribuição (Fig. 5), o programa produz animações georreferenciadas em diversos formatos, objetivando a visualização espacial em três dimensões com variáveis múltiplas (Golden Software, 2012).

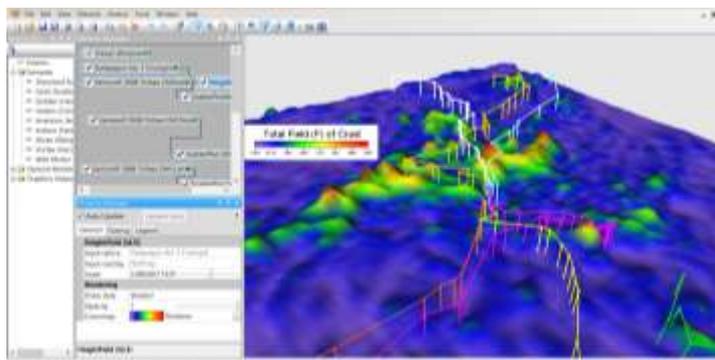


Fig. 5. Software VOXLER3 em processamento de mapas da distribuição do campo magnético terrestre em projeção 3D interativa. Fonte: Golden Software (2012).

3.3 Mapas contendo movimentações oceânicas de tartarugas marinhas

Recentes avanços na telemetria por satélites têm possibilitado o acompanhamento de animais marinhos em vastas regiões do globo. Na segunda metade da década de 1990, encontram-se trabalhos, com relativa precisão, de registros do posicionamento oceânico de tartarugas marinhas, dentre outros animais. Dentre estes registros, pode-se destacar o realizado por Luschi *et al.* (1998) (Fig. 6) realizado sobre migrações de tartarugas-verdes (*Chelonia mydas*) da Ilha de Ascensão, no Atlântico, para o Brasil.

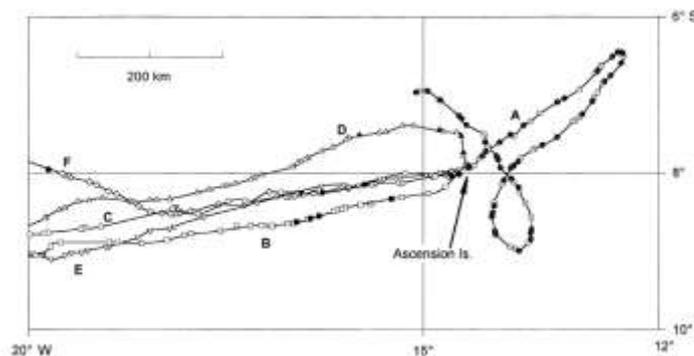


Fig. 6. Movimentos de tartarugas marinhas verdes saindo da Ilha de Ascensão para as praias do Brasil. Os registros mostram a distribuição georreferenciada de seis animais migratórios (de A a F). Fonte: Luschi *et al.* (1998).

A partir dos anos 2000, uma série de trabalhos acerca das movimentações de tartarugas marinhas utilizaram o sistema ARGUS (Argus System, 2012), dentre outros sistemas de monitoramento de telemetria via satélite. Entre muitos exemplos de monitoramento e consequente mapeamento de posições geográficas de tartarugas marinhas, pode-se citar o de Seminoff *et al.* (2008), com tartarugas migrantes no arquipélago de Galápagos (Fig. 7A), no Oceano Pacífico, e o de Girard *et al.* (2006), nas proximidades da Ilha Europa, no canal de Moçambique, África (Fig. 7B).

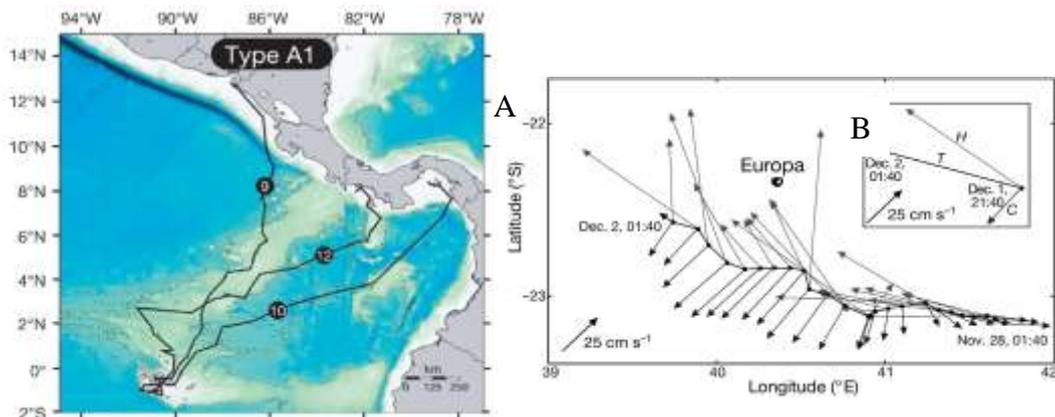


Fig. 7. Movimentos oceânicos de tartarugas-verdes das Ilhas Galápagos para o continente (A) e nas proximidades da Ilha Europa (África) com uso de telemetria via satélite. Fonte: Seminoff *et al.* (2008) e Girard *et al.* (2006).

3.4 Determinação da intensidade do campo geomagnético oceânico

- **Campo de Anomalias Magnéticas**

Para obter-se a intensidade de campo total (F) de anomalias magnéticas da crosta oceânica, foram subtraídas as intensidades do campo ampliado (obtida através do modelo EMM2010) das intensidades do campo magnético principal (por meio do modelo WMM2010), como mostrado na Figura 8. As anomalias assumem intensidades positivas (quando o campo local é superior ao campo principal de referência), ou negativas (quando o campo local é inferior ao campo principal de referência), variando conforme as estruturas geológicas de camadas da respectiva crosta.

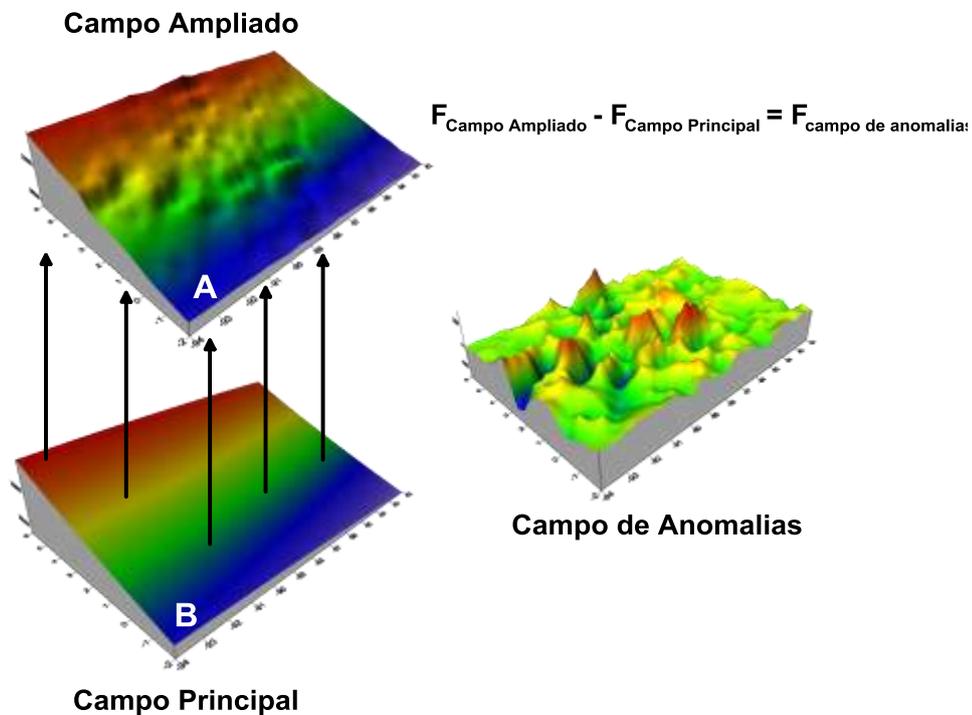


Fig. 8. Representação da construção do campo de anomalias geomagnéticas. Em (A) temos a distribuição do campo total (F) relativa ao campo ampliado (campo principal acrescido das contribuições da crosta terrestre), em (B) a distribuição do campo principal e em (C) o campo de anomalias resultantes da subtração de (A) por (B). As áreas possuem sempre os mesmos limites geográficos e são projeções Mercator construídas no software SURFER11.

A diferença entre as intensidades de F locais (campo ampliado) e o campo de referência global (campo principal) é muito utilizada na geologia para identificação de corpos magnéticos e suas variabilidade espacial e temporal, sendo esta determinação realizada através de magnetômetro de campo, ou por levantamentos aeromagnéticos. Em regiões remotas do oceano, a aplicação de modelos globais com dados de satélite muitas vezes torna-se a única forma de determinação da intensidade e da direção do campo.

- **Campo de Intensidade Total (F) relativo à Crosta Oceânica**

Para a determinação das intensidades do campo total (F), relativos às contribuições da crosta oceânica, foram subtraídas as componentes X, Y e Z, respectivamente, do campo ampliado (modelo EMM2010) à do campo principal (modelo WMM2010). As componentes de cada campo são designadas por nomenclatura própria (Fig. 9). F_A é a intensidade do campo ampliado, F_P é a intensidade do campo principal, e F_C é a intensidade do campo relativo à crosta. Suas denominações estão listadas abaixo:

F_{Ax} = Componente Norte-Sul do campo ampliado

F_{Ay} = Componente Leste-Oeste do campo ampliado

F_{Az} = Componente Vertical do campo ampliado

F_{Px} = Componente Norte-Sul do campo principal

F_{Py} = Componente Leste-Oeste do campo principal

F_{Pz} = Componente Vertical do campo principal

F_{Cx} = Componente Norte-Sul do campo da crosta

F_{Cy} = Componente Leste-Oeste do campo da crosta

F_{Cz} = Componente Vertical do campo da crosta

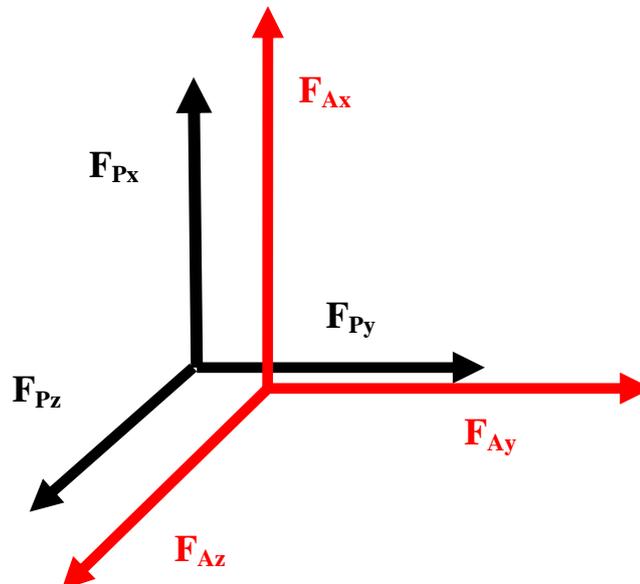


Fig. 9. Representação espacial das componentes do Campo Geomagnético Ampliado (em vermelho) e das componentes Campo Geomagnético Principal (em preto). As componentes do Campo Geomagnético Crustal são obtidas pela subtração das componentes respectivas de cada campo.

As componentes X, Y e Z, relativas à contribuição do campo total (F) da crosta, são:

$$\mathbf{F}_{Cx} = F_{Ax} - F_{Px}$$

$$\mathbf{F}_{Cy} = F_{Ay} - F_{Py}$$

$$\mathbf{F}_{Cz} = F_{Az} - F_{Pz}$$

Para determinarmos a intensidade de campo total relativa à crosta utiliza-se a equação:

$$(\mathbf{F}_C)^2 = (\mathbf{F}_{Cx})^2 + (\mathbf{F}_{Cy})^2 + (\mathbf{F}_{Cz})^2$$

ou

$$(\mathbf{F}_C)^2 = (\mathbf{F}_{Ax} - \mathbf{F}_{Px})^2 + (\mathbf{F}_{Ay} - \mathbf{F}_{Py})^2 + (\mathbf{F}_{Az} - \mathbf{F}_{Pz})^2$$

que fornece a intensidade relativa à crosta (\mathbf{F}_C) que sempre será positiva, já que o valor de F será a raiz quadrada da soma de números positivos, independentemente de variações positivas ou negativas de anomalias do campo geomagnético.

3.5 Desenvolvimento metodológico do trabalho

Foram realizados comparativos, visuais e matemáticos, entre o campo geomagnético e trilhas de tartarugas marinhas georreferenciadas, registros estes realizados por pesquisadores da área de biologia marinha para diversas regiões oceânicas do mundo. As contribuições dos pesquisadores foram publicadas em revistas especializadas (referenciadas a seguir em cada um dos capítulos) e mostram a movimentação dos animais em função de latitudes e longitudes, para os respectivos períodos de estudo. As profundidades não foram levadas em conta (assume-se a profundidade como padrão ao nível do mar – MSL – Mean Sea Level), pois os limites de mergulhos das espécies avaliadas não ultrapassam 200 metros a cada hora, o que não influencia na variabilidade do campo magnético, pois está a um nível abaixo da margem de erro dos modelos.

Os comparativos seguiram os seguintes passos:

3.3.1 Obtenção de dados geomagnéticos, com o uso de softwares dos modelos matemáticos WMM2010 e EMM2010 (descritos no item 3.1 deste capítulo). Montagem de tabelas, contendo latitudes, longitudes e intensidades de campo total (F), para as regiões e os períodos analisados.

3.3.2 Construção de projeções espaciais Mercator do campo de anomalias magnéticas sobre trilhas oceânicas de tartarugas marinhas (Capítulos 4 e 5), reconstruídas digitalmente, conforme a área e o período de estudo, realizadas com os softwares SURFER11 e VOXLER3 (descritos no item 3.2 deste capítulo), exemplificada na Figura 10.

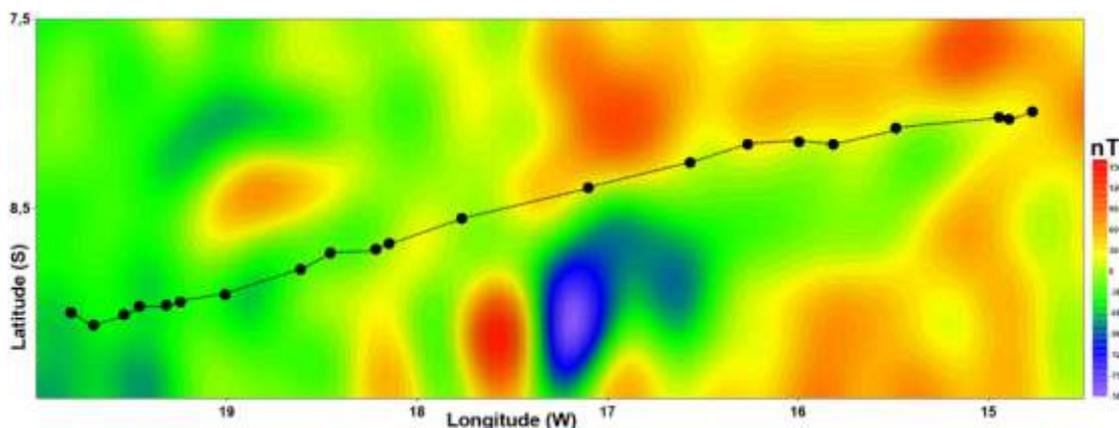


Fig. 10. Exemplo de projeção Mercator das posições geográficas de um espécime de tartaruga marinha sobre intensidades do campo de anomalias magnéticas ao longo de um trajeto oceânico. As regiões em vermelho indicam intensidade relativas mais fortes, azuis mais fracas e verdes intermediárias, como mostrado na escala (em nanoTesta) ao lado.

3.3.3 Construção de projeções espaciais Mercator, das intensidades de campo magnético crustal sobre trilhas oceânicas de tartarugas marinhas (Capítulos 6 e 7), trilhas estas reconstruídas digitalmente, conforme a área e o período de estudo, através dos softwares SURFER11 e VOXLER3 (descritos no item 3.2 deste capítulo) e exemplificada na Figura 11.

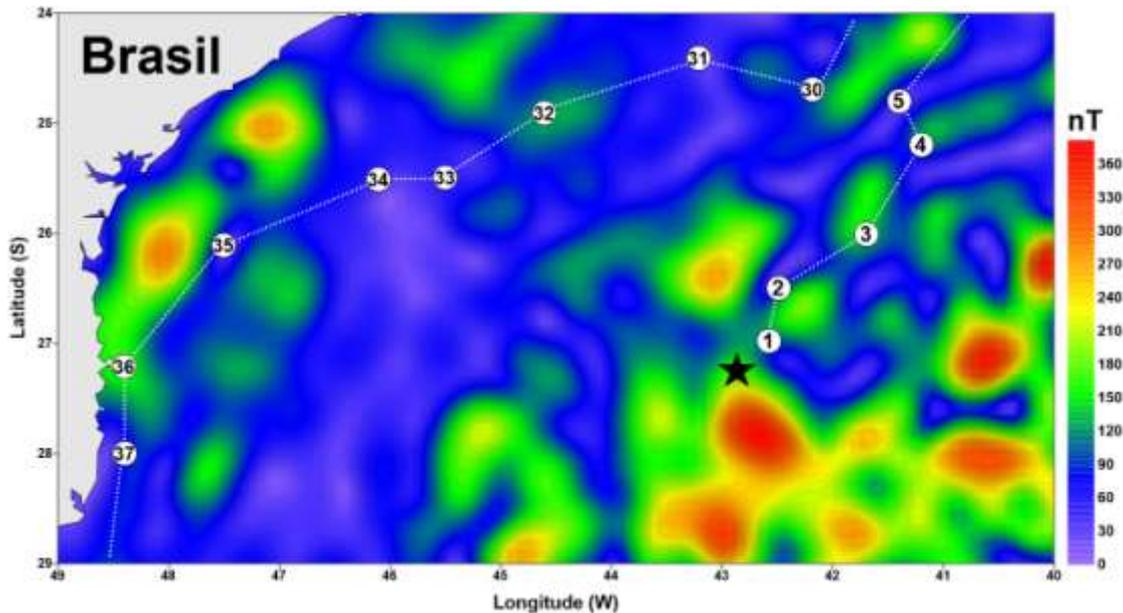


Fig. 11. Exemplo de projeção Mercator das posições geográficas de um espécime de tartaruga marinha sobre intensidades do campo magnético crustal ao longo de um trajeto oceânico. As regiões em vermelho indicam intensidade relativas mais fortes, azuis mais fracas e verdes intermediárias, como mostrado na escala (em nT) ao lado.

3.3.4 Plotagem de gráficos das intensidades do campo de anomalias e a intensidade crustal (com o uso do software EXCEL2007 – Microsoft Windows Software), referente às posições ocupadas por animais em cada um dos estudos realizados (Capítulos 4, 5, 6 e 7). Serão utilizados mapas de posicionamento global via satélite, como descritos no item 3.3 deste capítulo.

3.3.5 Construção de tabelas (Capítulos 6 e 7) referentes às intensidades do campo magnético crustal de regiões do entorno (área de meio grau por meio grau, ao redor de cada posição) referente a cada posição ocupada pelos animais e posterior projeção Mercator no Software SURFER11, conforme exemplificado na Figura 12.

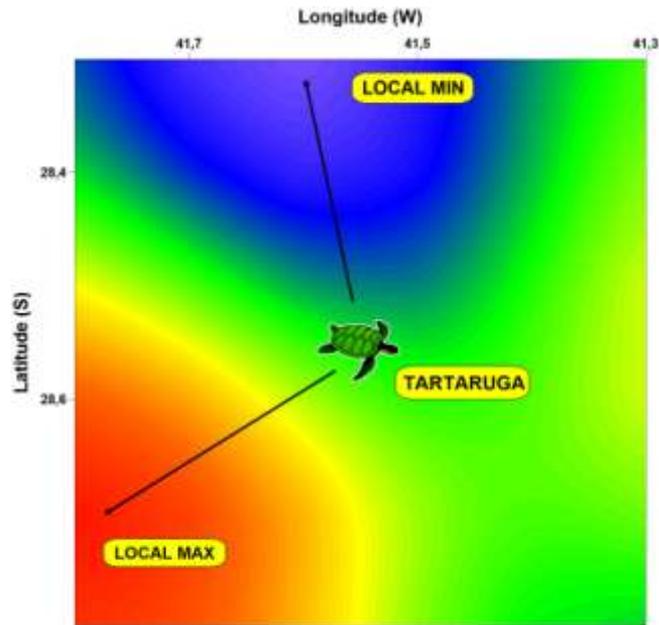


Fig. 12. Exemplo de projeção Mercator da posição de um espécime de tartaruga marinha sobre as intensidades do campo magnético crustal referente ao entorno (área de $0,5^\circ$ por $0,5^\circ$). As regiões em vermelho indicam intensidades relativas mais fortes, azuis mais fracas e verdes intermediárias, como mostrado na escala (em nanoTesta) ao lado.

3.3.6 Realização de comparativos entre intensidades do campo magnético crustal dos pontos ocupados por animais e seus respectivos máximos, mínimos e médias locais, e avaliação relativa durante toda a trajetória.

A seguir serão apresentados os resultados da metodologia descrita em forma de quatro artigos científicos. Dois destes artigos (Capítulos 4 e 5) realizaram comparativos de trajetos oceânicos de tartarugas marinhas com o campo de anomalias magnéticas, e outros dois (Capítulos 6 e 7), compararam com as intensidades totais do campo crustal.

CAPÍTULO 4

Green Turtles and the Crust's Magnetic Field

Artigo publicado no periódico

Ciencia y Tecnología del Mar

ISSN 0718-0969 - Vol. 34 (1 y 2), 2011

Comité Oceanográfico Nacional - Chile

Disponível em <http://www.cona.cl/ctmol2/vol34_1_2/06%20da%20Silva%2034.pdf>

www.cona.cl

Green Turtles and the Crust's Magnetic Field

Guilherme P. da Silva and Tereza C. M. de Araújo

Laboratório de Geologia Marinha (LABOGEO), Departamento de Oceanografia, Centro de Tecnologia e Geociências, Universidade Federal de Pernambuco (UFPE), Cidade Universitária, 50670-901, Recife - PE, Brazil.

Author for correspondence (guilherme.pereirasilva@ufpe.br)

Ciencia y Tecnología del Mar

ISSN 0718-0969 - Vol. 34 (1 y 2), 2011

Comité Oceanográfico Nacional - Chile

Disponível em <http://www.cona.cl/ctmol2/vol34_1_2/06%20da%20Silva%2034.pdf>

www.cona.cl

Summary

The migration of green turtles (*Chelonia mydas*) is a mystery in marine biology due to long distances these animals cover with great accuracy. A comparative study with the migratory patterns of green turtles and the earth's magnetic field was carried out. The newest geomagnetic models (WMM2010 and EMM2010) were used to determinate the intensities of crust's magnetic field throughout the turtle's migration routes. Intensity maps of the crust's magnetic field were overlapped over the turtle's tracks from different areas around the world. The results showed several magnetic anomalies nearby the turtle's routes. A comparative analysis indicated that these animals move preferentially through low variations regions of the crust's magnetic field. They don't seem to cross the strong variations regions of the magnetic field. The results suggest that the crust's magnetic anomalies can be used as a way to predict the most probable routes of green turtles migrations.

Key Words: green turtles, geomagnetism, migration, navigation.

Introduction

According to the current geophysical model, the Earth's magnetic field is composed by the Main Magnetic Field (MMF), generated by the planet's outer core, the Crust's Magnetic Field (CMF), generated by the most external layer of the solid rocks, and the diurnal variations of the ionosphere (Matzner, 2001). MMF's levels vary from 22 000 to 60 000 nanoTesla (nT) in modular magnitude and global dimensions. CMF's levels vary from tens to hundreds nT in modular magnitude (Gubbins and Herrero-Bervera, 2007). In late 2009, updates of mathematical models were introduced, to describe the geomagnetic field. Updates of the World Magnetic Model (WMM) and the Enhanced Magnetic Model (EMM) were presented and incorporated a new technological advance to access the geomagnetic components (Butler, 2004). The new models collect experimental data obtained from several sources, including those generated by magnetic sensors installed on satellites. In November 2009 the new WMM model elaborated by the National Geophysical Data Center (NGDC), National Oceanic and Atmospheric Agency (NOAA), British Geological survey (BGS) and North Atlantic Treaty Organization (NATO) was presented. This model evaluated the main Earth's magnetic field from 2010 to 2015, including the data already consolidated from 1900 to 2010 (WMM, 2010). In December 2009, the new model EMM produced by NOAA and NGDC was introduced. The EMM model determines the MMF's intensities and added to the CMF's intensities, these sums were called Enhanced Magnetic Field (EMF), and were applied to range of 50 km depth (EMM, 2010). These models (WMM2010 and EMM2010) are also applied to the oceanic provinces, and are a tool to marine geology and the study of oceanic environments.

Marine biologists have pointed the Earth's magnetic field as a possible parameter to the magnetic perceptions of animals like several species of turtles (Lohmann *et al.* 2008; Luschi *et al.*, 2001), large pelagic fish (Willis *et al.*, 2009) and crustaceans (Alerstam, 2003).

Green turtles (*Chelonia mydas*) are possibly capable to perceive local magnetic conditions during migration movements (Hazel, 2009; Lohmann, 2007). These animals were found in tropical and subtropical environments of the Atlantic, Pacific, and Indian Oceans (Plotkin, 2003). One of the migration areas of these species is Ascension Island, British territory of Saint Helen in the South Atlantic Ocean, where it has been followed by satellite telemetry (Hays *et al.*, 2001). These animals travel an approximate distance of 2 300 km over the Atlantic Ocean, in regular migrations of 2 or 4 years (Luschi *et al.*, 1998). Females always return to the beach where they were born (Lutz *et al.*, 2003). Johnsen and Lohmann (2008)

reported a kind of navigation to the species associated with a complex, and not completely explained mechanism. Hays *et al.* (2003) examined the wind influence over the migration of these turtles and pointed to an important factor. The tracks of these animals over the ocean have been accompanied in several parts of the world by a range of researchers using satellite. We will analyze some of those on the following session.

Luschi *et al.* (1998) and Papi *et al.* (2000) used the satellite telemetry by Argos system on migrations of green turtles from the Ascension Island to Brazil, tracking both total and adjacent movements (Argos System, 2008). With the same telemetry system Åkesson *et al.* (2003) analyzed a group of turtles nearby Ascension Island. Witt *et al.* (2010) described the precision of telemetry methods over oceanic's routes of green turtles from Brazil to Ascension Island. Cheng (2000) related the migratory routes of green turtles at Wan-An Island in Penghu Archipelago (Taiwan) during the summers 1994 and 1997 using satellite transmitters. Godley *et al.* (2003) relates the routes of green turtles from Guinea-Bissau to Mauritania attaching ten satellite transmitters to turtles in November 2001. Balazs and Ellis (2000) described the breeding of green turtles from French Frigate Shoals (Maui) to Kaneohe Bay (Oahu) in Hawaiian Islands. Broderick *et al.* (2007) presented the movements of green turtles into Mediterranean Sea to 1998/2002. The movements of green turtles from Tortuguero (Costa Rica, Central America) were studied by Tröeng *et al.* (2005). Navigation of green turtles was tracked by satellite around Europe Island (Africa) by Girard *et al.* (2006). Seminoff *et al.* (2008), describes green turtle's movements in Galápagos Island integrating satellite telemetry with remotely sensed ocean data. The green turtles traveling from Ogasawara Islands (Japan) were monitored by Hatase *et al.* (2006).

Green turtles are usually monitored by telemetry and some parameters exist that are believed to possibly influence the ocean navigation, such as temperature, speed of oceans currents, salinity of water, feeding areas and the connection with predators, among others. In the present study we will investigate the variability of the CMF near the routes of the animals, searching for a consistent relationship. This work aims to identify possible connections between the tracks of the green turtles (*Chelonia mydas*) and the CMF's intensities at several oceanic areas of the world.

Material and Methods

The method used includes determining the CMF's intensities (module of the vector Total Field of the Earth's Crust) on areas studied by several researchers, comparing the locations of the CMF's anomalies with the routes of green turtles (*Chelonia mydas*). This will be a work of mathematical calculation of the CMF and their geographical distribution, in the regions where turtle's movements were followed.

For mathematical calculation of the MMF the software WMM2010_grid.c (in C++ language) was used. This software determine the intensities of the geomagnetic total field components and contains coefficients updated by BGS and NOAA from 2010 to 2015 (WMM, 2010), including the consolidated period from 1900 to 2010. The accuracy is 0.1 nT in MMF's intensities and 0.01 degrees in angular components (magnetic declination and magnetic inclination). All intensities were calculated to the mean sea level altitude (MSL), in a respective date and 0.1 of step degree. With the WMM2010 model, tables containing the geographic coordinates and the MMF's intensities were assembled. The EMM2010 model has the same accuracy and coverage of the WMM2010 model and determinates the Enhanced Magnetic Field (EMF) that correspond the MMF added to the CMF (EMM, 2010). The WMM2010 and EMM2010 models cover a range of 1 000 m below MSL until 850 km above. The software EMM2010_grid.c in C++ language produced by NOAA and NGDC was used in determining the EMF. With EMM2010 model were assembled EMF's tables according to each area studied.

The MMF's intensities were subtracted from the EMF's intensities and thus it was obtained values that represent the magnetic field intensities generated by the Earth's crust (CMF). All values were calculated in this work for altitudes of MSL. Due to the fact the obtained tables were very extensive (from 700 to 30 951 lines) they were presented as supplementary tables (numbered from S1 to S14). The magnetic models description and software used here are ready to use and can be accessed for researchers in NOAA-NGDC official sites as follows:

WMM2010 (<http://www.ngdc.noaa.gov/geomag/WMM/DoDWMM.shtml>)

EMM2010 (<http://ngdc.noaa.gov/geomag/EMM/emm.shtml>)

Using the Surfer 9 software (Surfer, 2009), grids of the CMF's intensities were assembled and the respective maps built with colored contours. The Kriging method on mathematical approach was used and contour lines were made by rainbow color type. Each map constructed

reproduces the CMF's intensities for a demarked oceanic region to a correspondent year and the color indicates the magnetic intensities.

Several descriptive maps of the green turtles migration's routes were used and their tracks by satellite telemetry detached. It was used maps included in works according to Luschi *et al.* (1998), Åkesson *et al.* (2003), Witt *et al.* (2010), Cheng (2000), Godley *et al.* (2003), Balazs and Ellis (2000), Broderick *et al.* (2007), Tröeng *et al.* (2005), Girard *et al.* (2006), Seminoff *et al.* (2008) and Hatase *et al.* (2006). The geographical limits of each researcher's area studied are listed in the Table 1, covering diverse world's zones in different oceans.

Table 1. Identification of the researchers with the respective publication dates included, date of data collection, locations and their limits of geographical coordinates (latitudes and longitudes in degrees).

Researcher	Date	Location	Latitude limits	Longitude limits
Luschi <i>et al.</i> (1998)	(1997)	Ascension Island (Atlantic Ocean)	6°S - 10°S	12°W - 20°W
Åkesson <i>et al.</i> (2003)	(2000)	Ascension Island (Atlantic Ocean)	6.5°S - 8.5°S	14°W - 17.5°W
Witt <i>et al.</i> (2010)	(2002)	Open South Atlantic Ocean	9.22°S - 11.66°S	32.14°W - 34.87°W
Cheng (2000)	(1996)	Taiwan (China Sea)	21.25°N - 27.5°N	119°E - 128.5°E
Godley <i>et al.</i> (2003)	(2001)	Guinea-Bissau (Africa)	9°N - 23°N	12°W - 20°W
Balazs and Ellis (2000)	(1995)	Hawaiian Islands (Pacific Ocean)	18.5°N - 24.24°N	154.5°W - 166.5°W
Broderick <i>et al.</i> (2007)	(2002)	Cyprus to Libya (Mediterranean)	30°N - 38°N	7.5°E - 38°E
Tröeng <i>et al.</i> (2005)	(2002)	Tortuguero (Caribbean Sea)	9.6°S - 16.1°S	79.8°W - 87.4°W
Girard <i>et al.</i> (2006)	(2003)	Mozambique Channel (Africa)	22°S - 25°S	37°E - 43°E
Seminoff <i>et al.</i> (2008)	(2005)	Galápagos (Pacific Ocean)	2°S - 15°N	77°W - 95°W
Hatase <i>et al.</i> (2006)	(1998)	Ogasawara Islands (North Pacific)	25.7°N - 35.6°N	129.4°E - 144.3°E

Following the track's maps were overlapped (produced by each researcher cited) to the respective maps of CMF. A comparative evaluation over the positions of the animal's tracks and the crust's magnetic field intensities were then prepared.

Results

Applying the WMM2010 and EMM2010 models, the intensities of the Earth's magnetic field were obtained from the turtle's migration area in Luschi *et al.* (1998). With calculations of the MMF's intensities, a table was generated with 3 280 lines (Table S1). This table was transposed to a grid and the geographic distribution as shown in Fig. 1A. With calculations of the EMF's intensities a table was generated with 3 280 lines (Table S2). This table was transposed to a grid and the geographical distribution presented in Fig. 1B. Subtracting the MMF's values from the EMF's, a table with 3 280 lines of the CMF's intensities at MSL was produced (Table S3). The respective grid was constructed and the map of the CMF's intensities is presented in Fig. 1C, which shows regions without non-regular variations (CMF's magnetic anomalies).

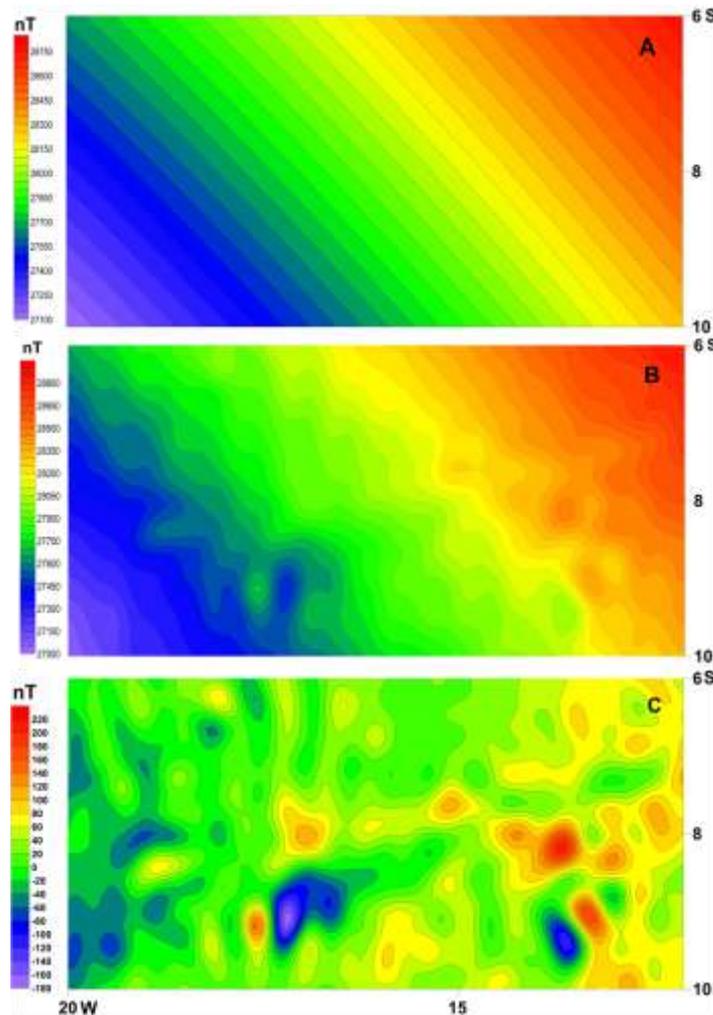


Fig. 1. Charts of the MMF's intensities (A), EMF's (B) and CMF's (C) at MSL. The region refers to initial migration of green turtles (*Chelonia mydas*) by Luschi *et al.* (1998) nearby the Ascension Island. The charts were constructed on equatorial Mercator's projections and the color scale indicates magnetic field's intensities.

Overlapping the migratory tracks by Luschi *et al.* (1998) over Fig. 1C, Fig. 2 was produced which represents a contrast between turtle's tracks and the CMF's intensities to this oceanic area at MSL.

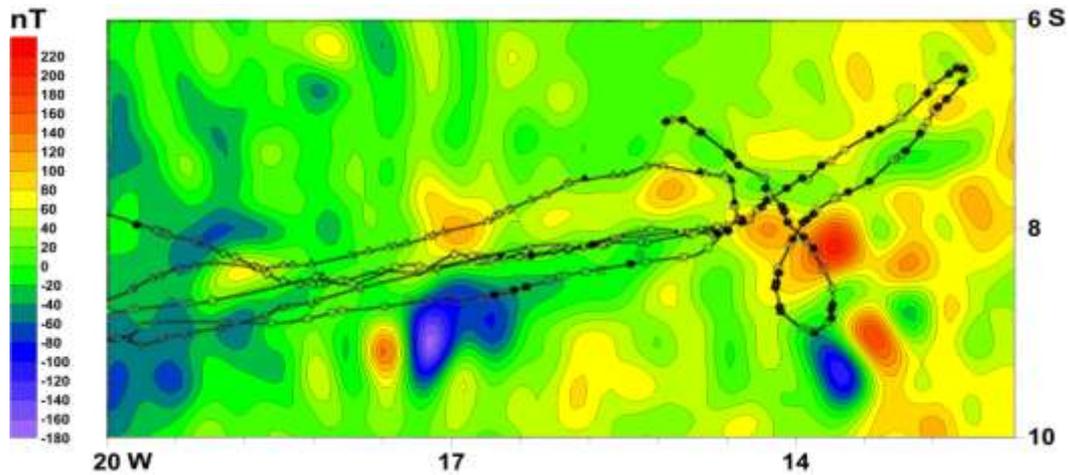


Fig. 2. Tracks of migrating green turtles (*Chelonia mydas*) by Luschi *et al.* (1998) overlapped to the CMF's intensities map. The color scale indicates the CMF's intensities at MSL. The chart was constructed on equatorial Mercator's projection.

Using the same methodology a map of the CMF's intensities, described by Åkesson *et al.* (2003), a table was built with 735 lines, nearby the Ascension Island (Table S4). Fig. 3 shows the superimposition of turtle's tracks over the respective map of the CMF's intensities.

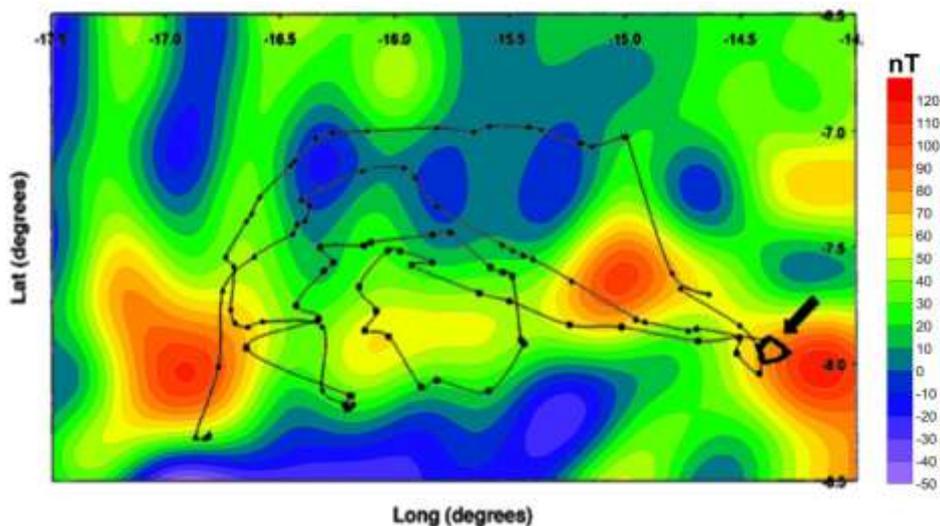


Fig. 3. Green turtle's (*Chelonia mydas*) tracks by Åkesson *et al.* (2003) nearby the Ascension Island (indicated by black arrow) superimposed to the CMF's intensities. The color scale indicates the CMF's intensities at MSL.

With this methodology a map of CMF's intensities, of the area described by Witt *et al.* (2010), tracking a green turtle from Brazil to the Ascension Island over the ocean, was built

using a calculated table with 700 lines (Table S5). Fig. 4 shows the superimposition of turtle's tracks over the map of CMF's intensities.

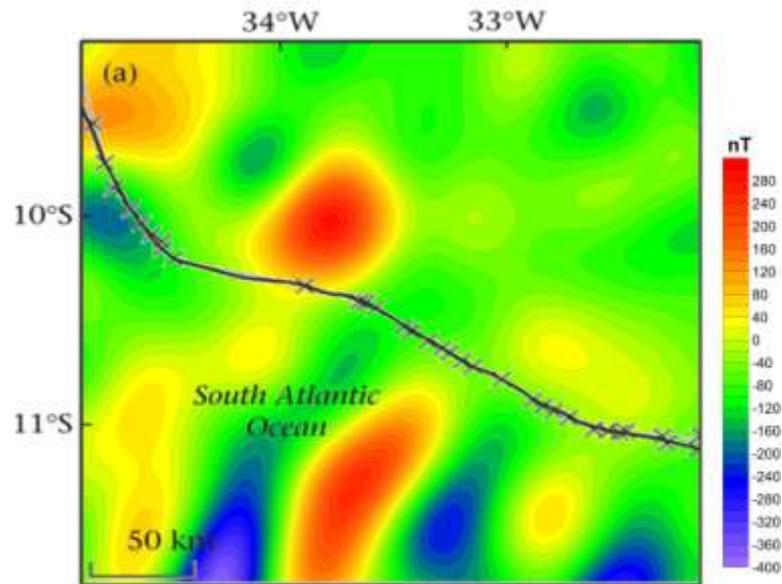


Fig. 4. Open ocean's track of a green turtle (*Chelonia mydas*) migrating from Brazil to the Ascension Island by Witt *et al.* (2010) overlapped to the CMF's intensities. The color scale indicates the CMF's intensities at MSL.

With this procedure a table with 6 048 lines was generated (Table S6) and a map of the CMF's intensities on the area analyzed by Cheng (2000), relative to the China Sea from Taiwan to Okinawa, was constructed. From the overlap of the turtle's tracks over the CMF's intensities, Fig. 5 was obtained.

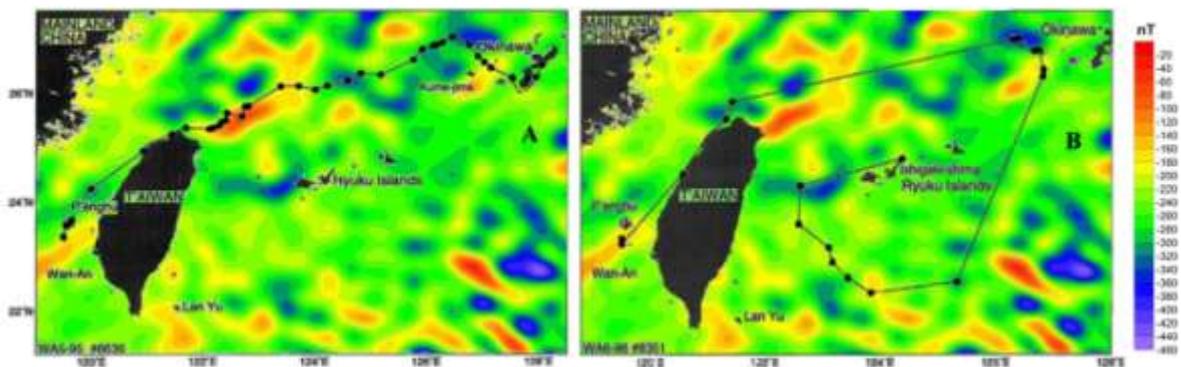


Fig. 5. Migration of two green turtles (A and B) at China Sea by Cheng (2000) overlapped to map of the CMF's intensities. The color scale indicates the CMF's intensities at MSL.

A table with 16 800 lines was generated (Table S7) and a map of the CMF's intensities to the movements of green turtles from Guinea-Bissau to Mauritania (Africa) by Godley *et al.*

(2003) was constructed. The authors used reversed longitudes ($360^\circ - \lambda$). Using the overlap from these maps (turtle's tracks in red) to the CMF's intensities, Fig. 6 was obtained.

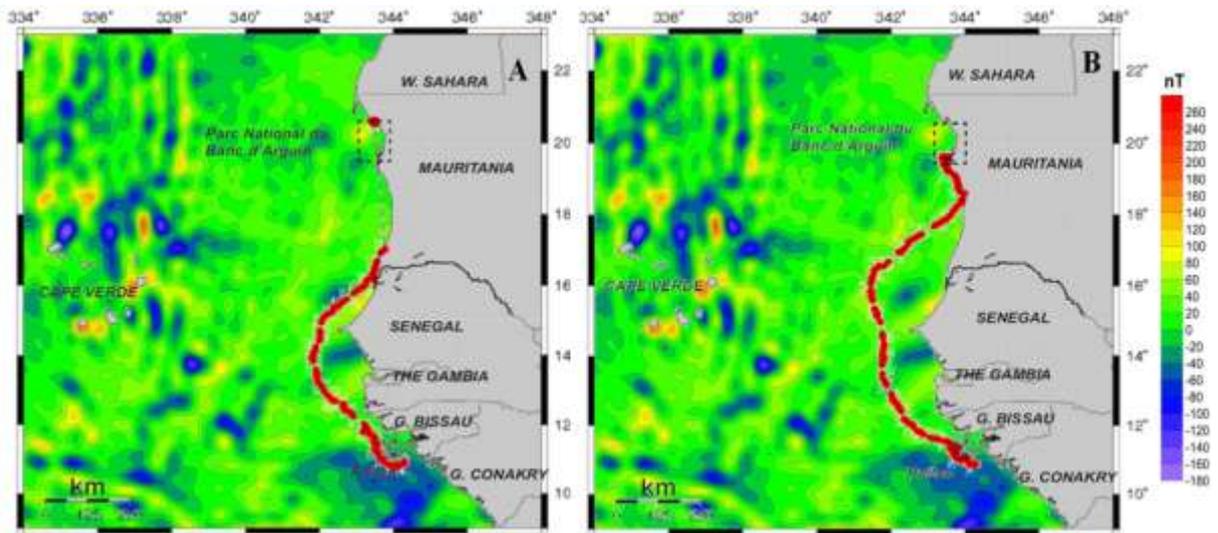


Fig. 6. Migrations of two (A and B) green turtles from Guinea-Bissau to Mauritania (Africa) by Godley *et al.* (2003) overlapped to map of the CMF's intensities. The color scale indicates the CMF's intensities at MSL.

Applying this procedure to the area by Balazs and Ellis (2000), from the French Frigate Shoals to Molokai (Maui) and Oahu in the Hawaiian Islands, a table with 7 018 lines was generated (Table S8) and a map of the CMF's intensities constructed. Using the overlap of these tracks over the CMF's intensities, Fig. 7 was obtained.

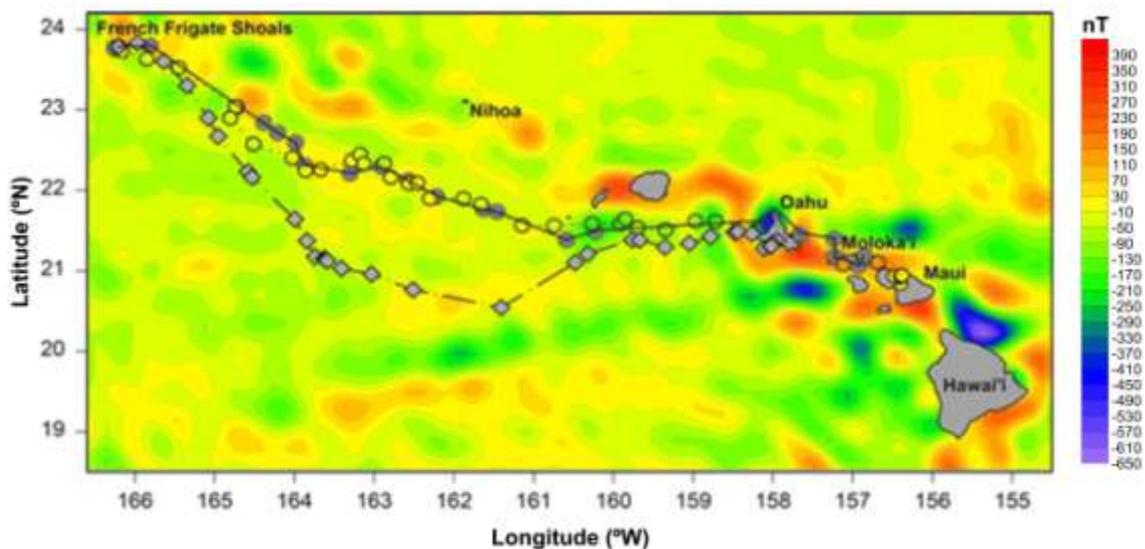


Fig. 7. Migration of green turtles from French Frigate Shoals to Kaneohe Bay in the Main Hawaiian Islands by Balazs and Ellis (2000), overlapped to map of the CMF's intensities. The color scale indicates the CMF's intensities at MSL.

Relative to migratory green turtle's tracks by Broderick *et al.* (2007), a table with 1 054 lines was generated (Table S9) and a map of the CMF's intensities for the Mediterranean Sea (between Cyprus and Libya) was constructed. Using the overlap of this track over the CMF's intensities, Fig. 8 was obtained.

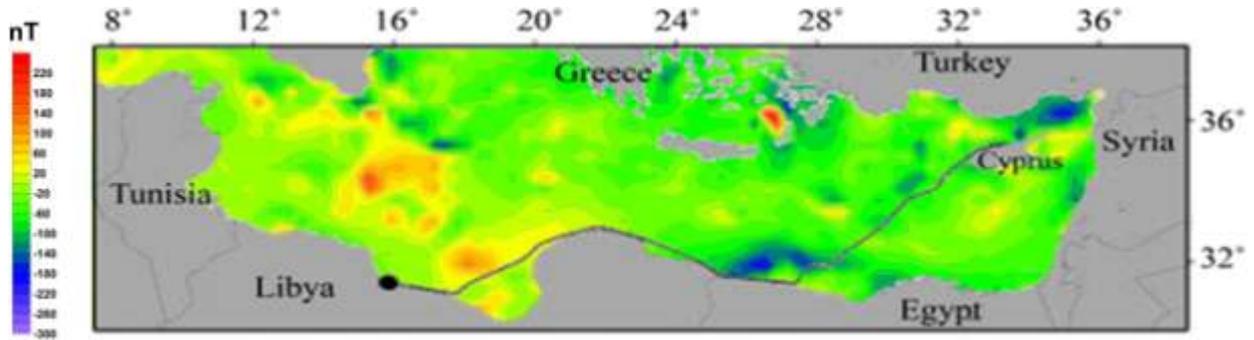


Fig. 8. Migration of a green turtle (*Chelonia mydas*) in Mediterranean Sea by Broderick *et al.* (2007) overlapped to map of the CMF's intensities. The color scale indicates the CMF's intensities at MSL.

In movements of a green turtle to the Caribbean Sea by Tröeng *et al.* (2005), a table with 5082 lines (Table S10) was generated and the CMF's intensities map constructed. Using the overlap of the turtle's track over the CMF's intensities maps, Fig. 9 was obtained.

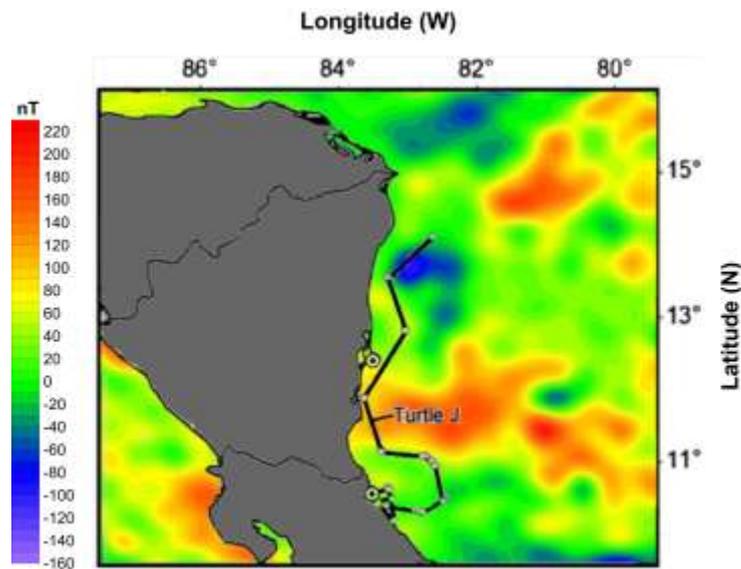


Fig. 9. Track of a green turtle between Costa Rica and Nicaragua (Central America) by Tröeng *et al.* (2005) overlapped over map of the CMF's intensities. The color scale indicates the CMF's intensities at MSL.

In movements of green turtles around Europa Island (Africa) by Girard *et al.* (2006) table A was generated with 1 800 lines (Table S11) and table B with 2 400 lines (Table S12), thus the CMF's intensities map to each case was constructed. Using the overlap of the turtle's tracks over the CMF's intensities maps, Fig. 10 was obtained.

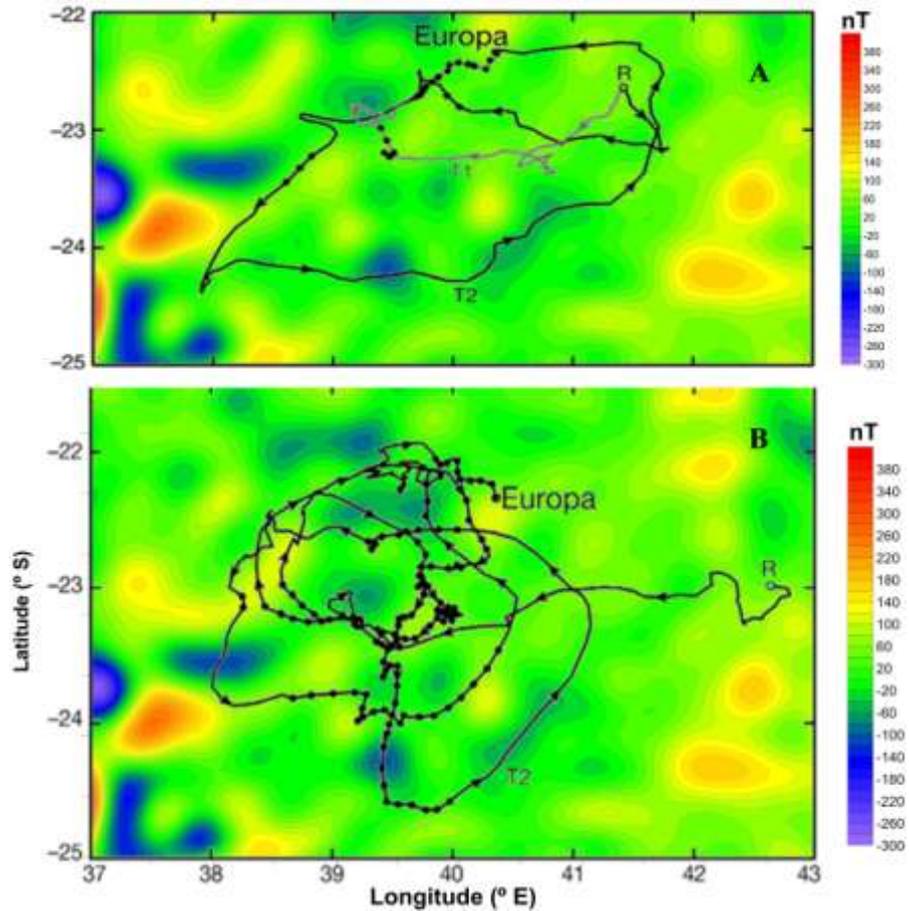


Fig. 10. Green turtle' tracks (A and B) nearby the Europa Island (Mozambique Channel, Africa) by Girard *et al.* (2006) overlapped to the maps of the CMF's intensities. The color scale indicates the CMF's intensities at MSL.

Seminoff *et al.* (2008) registered tracks of green turtles from Galápagos Islands to Central America producing several route's maps. Data of the type A1 turtles (designation by cited authors) generated a table with 30 951 lines (Table S13) relative to the CMF's intensities and the respective map constructed. Using the overlap of the turtle's tracks over the CMF's intensities maps, Fig. 11 was obtained.

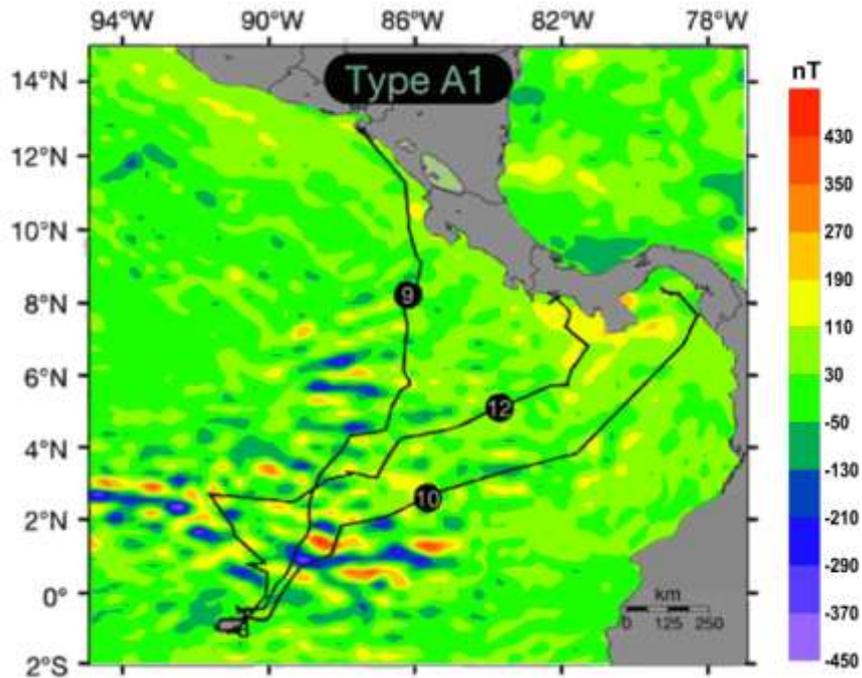


Fig. 11. Tracks of green turtles from Central America to Galápagos Islands (Type A1) by Seminoff *et al.* (2008) overlapped to map of the CMF's intensities. The color scale indicates the intensities of the CMF at MSL.

Relative to the movements of green turtles from Ogasawara Islands (Japan) by Hatase *et al.* (2006), a table with 14 850 lines (Table S14) was generated and the CMF's intensities map constructed. From the overlap of the turtle's tracks to the CMF's intensities map, Fig. 12 was obtained.

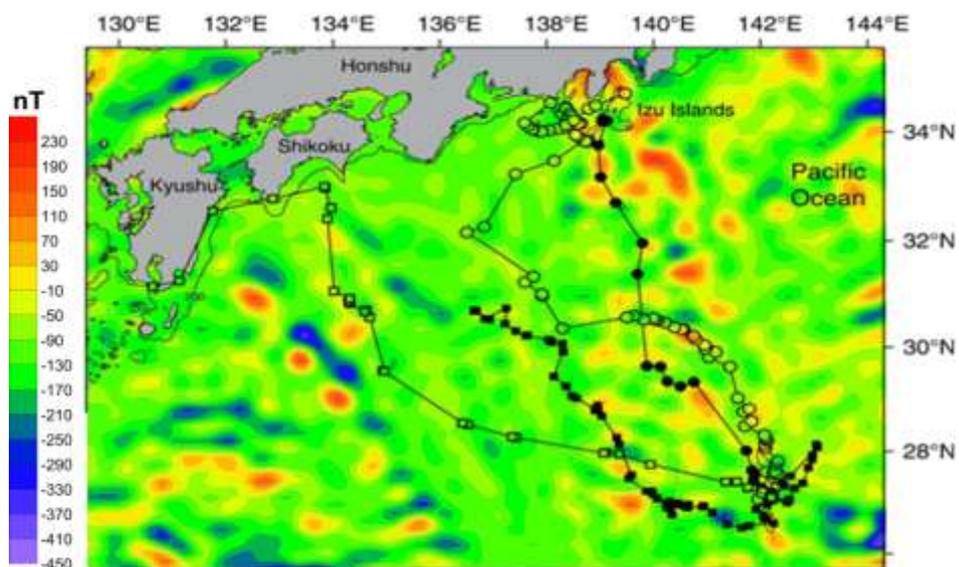


Fig. 12. Post-nesting routes with four green turtles tracked by satellite from Ogasawara Islands (Japan) by Hatase *et al.* (2006), overlapped to map of the CMF's intensities. The color scale indicates the CMF's intensities at MSL.

71 main centers of the CMF's anomalies identified and located near the turtle tracks and their geographical locations (latitudes and longitudes) are shown in Table 2.

Table 2. Identification of main centers of the CMF's anomalies by numbers (Nr.) nearby the green turtle's tracks for all researchers cited. The CMF's intensities (nT unity) are relative to center of the anomalies and their respective coordinates (latitudes and longitudes) are included.

Researcher and area	Nr.	Latitude (°)	Longitude (°)	CMF Intensity (nT)	Researcher and area	Nr.	Latitude (°)	Longitude (°)	CMF Intensity (nT)
Luschi et al. (1998) Ascension Island Atlantic Ocean	(01)	8.1 S	13.7 W	201.9	Broderick et al. (2007) Mediterranean Sea	(36)	32.1 N	26.0 E	-170.1
	(02)	9.0 S	13.3 W	179.1		(37)	32.0 N	18.1 E	127.0
	(03)	9.4 S	13.6 W	-121.7		(38)	34.0 N	30.0 E	-125.2
	(04)	9.1 S	17.2 W	-176.2		(39)	36.0 N	34.5 E	-178.9
	(05)	7.6 S	15.1 W	112.6					
	(06)	8.0 S	16.9 W	113.6					
	(07)	9.1 S	17.6 W	138.9					
	(08)	8.0 S	14.2 W	126.8					
Akesson et al. (2003) Ascension Island Atlantic Ocean	(09)	8.0 S	14.2 W	119.0		Trøeng et al. (2005) Costa Rica Atlantic Ocean	(40)	13.6 N	83.2 W
	(10)	7.6 S	15.1 W	106.2	(41)		11.7 N	83.1 W	167.8
	(11)	8.2 S	15.4 W	-26.8	(42)		11.5 N	82.6 W	174.5
	(12)	8.0 S	16.9 W	110.7	(43)		13.0 N	82.7 W	-47.7
	(13)	7.1 S	16.3 W	-11.9					
	(14)	8.3 S	15.4 W	-28.2					
Witt et al. (2010) Atlantic Ocean	(15)	9.6 S	34.7 W	134.1	Girard et al. (2006) Europa Island Africa Map A	(44)	23.4 S	38.1 E	-114.2
	(16)	10.0 S	34.7 W	-196.4		(45)	23.9 S	37.5 E	267.2
	(17)	10.0 S	33.8 W	299.7		(46)	24.2 S	39.4 E	-110.1
	(18)	11.2 S	33.7 W	257.8		(47)	23.7 S	40.2 E	122.2
	(19)	11.4 S	33.3 W	-237.5		(48)	24.3 S	42.1 E	179.5
				(49)	23.6 S	42.4 E	172.5		
Cheng (2000) Taiwan China Sea	(20)	25.5 N	122.7 E	-65.7	Girard et al. (2006) Europa Island Africa Map B	(50)	23.4 S	38.1 E	-114.2
	(21)	26.0 N	122.8 E	-380.2		(51)	23.8 S	37.6 E	253.7
	(22)	26.1 N	124.6 E	-335.8		(52)	24.2 S	39.4 E	-110.1
	(23)	27.0 N	125.4 E	-116.5		(53)	22.2 S	40.3 E	123.4
	(24)	26.0 N	126.8 E	-116.3		(54)	21.6 S	39.2 E	-90.9
	(25)	24.2 N	123.3 E	-350.4					
	(26)	25.7 N	122.1 E	-336.1					
Godley et al. (2003) Guinea-Bissau to Mauritania Africa	(27)	14.6 N	17.6 E	-53.1	Seminoff et al. (2008) Galápagos Pacific Ocean Type A1	(55)	0.8 N	89.0 W	-388.6
	(28)	14.4 N	16.7 E	116.0		(56)	1.4 N	88.6 W	492.8
	(29)	13.2 N	17.2 E	-49.4		(57)	1.8 N	88.5 W	341.0
	(30)	9.7 N	15.5 E	-86.9		(58)	1.8 N	86.8 W	-243.3
				(59)		4.5 N	87.7 W	-313.4	
				(60)		4.1 N	87.5 W	246.8	
Balazs and Ellis (2000) Hawaiian Islands Pacific Ocean	(31)	24.1 N	166.2 W	84.6	Hatase et al. (2006) Japan Pacific Ocean	(66)	30.1 N	134.3 E	89.4
	(32)	23.1 N	164.5 W	150.4		(67)	29.3 N	134.3 E	-319.1
	(33)	22.0 N	159.9 W	328.4		(68)	26.9 N	139.6 E	149.8
	(34)	22.0 N	158.4 W	216.7		(69)	26.7 N	141.3 E	-290.7
	(35)	21.2 N	157.6 W	352.1		(70)	28.9 N	140.9 E	115.0
				(71)		31.3 N	140.5 E	202.5	

Discussions

With the results of the comparison between CMF's intensities and green turtle tracks (seen in Figs. 2 through 12), conducted by diverse researchers in several areas, from around the world and under different oceanic environments, it was observed a common behavior to the analyzed components (earth's magnetism and geographic movements). It is assumed that the presence of these magnetic anomalies can be understood as an important component to the animal navigation system, although not completely comprehended yet. To test this hypothesis diverse analysis about the variability of the components involved were needed in addition to specific data to each region. It was observed that the CMF's anomalies represent relative variations and was not absolute, so the intensities have a local importance to each case. Noting the various regions were studied separately and with their respective variability, everyone's case is stated as follows.

Looking at the Fig. 2, eight main magnetic anomalies are identified in the vicinity of the Ascension Island investigated by Luschi *et al.* (1998). It is observed that the movements of the turtles are always out off the center of the magnetic anomalies (numbered from 01 to 08 in Table 2). An exception seems to occur at anomaly number 06 but observing carefully the animal's tracks, it does not cross the geographical center of that anomaly. It is possible that the imprecision of the geomagnetic model used (around 1 minute of arc over the ocean) could be responsible for this uncertainty.

Fig. 3 shows 06 main magnetic anomalies (09 to 14 in Table 2) around the Ascension Island described by Åkesson *et al.* (2003). Trajectories are at external boundary of all centers of these anomalies described. The tracks were laid in areas where little change in the CMF's intensity exists.

Analyzing Fig. 4, open ocean turtle's migration from the coast of Brazil and Ascension Island by Witt *et al.* (2010), are identified 05 main anomalies (from 05 to 19 in Table 2). It is observed that the way of the animal does not transpose any center of anomalies indicated, but crosses areas where the CMF's intensities have a regular variation.

Over the China Sea area by Cheng (2000), are identified 07 main anomalies (20 to 26 in Table 2) close to the path traveled by migrants turtles, which are shown in Figure 5 (A and B). It was observed that the anomalies 20, 23, 24 and 25 weren't transposed by turtle's tracks, while the anomalies 21 and 22 had strong approximation, inaccuracy may come from the

large scales used. At anomaly 21 there is a large distance between two points of position's measurements which makes its location imprecise to this part of the route.

Analyzing the area of turtle's movements described by Godley *et al.* (2003) from Guinea-Bissau to Mauritania (Africa) are identified 04 main centers of anomalies (27 to 30 in Table 2). In all these anomalies the green turtle's tracks do not overcome the centers of major variations of CMF (maps A and B at Fig. 6), traversing only areas of low magnetic variation.

In migration's area examined by Balazs and Ellis (2000) in Hawaiian Islands (Fig. 7) were 05 main anomalies (31 to 35 in Table 2) nearest to the route described by the turtles. The anomaly 31 (north of French Frigate Shoals) is a limit for all animals, both the male (represented by trapezoids) as the females (represented by circles). The tracks do not cross over the CMF's anomalies.

In the movement studied by Broderick *et al.* (2007) to the Mediterranean Sea were 04 main magnetic anomalies (36 to 39 in Table 2) near the tracks. None of them have transposition over anomaly's centers as seen in Fig. 8.

In the Caribbean Sea examined by Tröeng *et al.* (2005), shown in the Fig. 9, the turtle's tracks monitored pass around the anomalies (40 to 43 in Table 2) and any transposition of the center of these anomalies occurs.

In the movements studied by Girard *et al.* (2006) around the Europa Island in Africa (Fig. 10), were 06 main anomalies on map A and 05 main anomalies on map B (44 to 54 in Table 2). In most cases the routes were outside of the anomalies. Two exceptions can be seen on Map B (anomalies 50 and 52) where the animals circulate to areas very close to the center of anomalies (but not crossing). These exceptions might be due to the model used.

On the map generated by Seminoff *et al.* (2008) in movements between Central America and the Galapagos Islands (Fig. 11), were 06 main magnetic anomalies for type A1. In all of the observed anomalies (55 to 65 in Table 2) the animals move around the center of the strongest variations. Interestingly, two specimens apparently cross anomaly 55, but a closer look shows no crossing of the geographic center of the anomaly.

In the movements of turtles described by Hatasi *et al.* (2006) to the Pacific Ocean near the Japanese Islands (Fig. 12) were 06 main anomalies (66 to 71 in Table 2). A greater number of anomalies were observed in this case, but they behave bordering the trajectories followed by 04 specimens of turtles, in some cases the model doesn't have sufficient spatial resolution for a better and accurate determination.

Even with many examples that point to a direct influence of CMF over the trajectories of migrating green turtles, we can't conclusively affirm that this occurs. We should note other factors before establishing a direct relation of these two parameters. For example: the magnetic field generated by the earth's crust has much lower intensity (order of tens or hundreds nT) compared with the main magnetic field (order of thousands nT), so it seems unlikely that the intensity of this field directly influences the behavior of aquatic animals. Thus we can't eliminate the possibility that CMF reflect indirectly another geophysical condition, generated by the oceanic crust that is capable to make animals in tracks most likely. Among these indirect influences we can highlight the speed's variations of ocean currents due to the physiographic specific structures of the sea floor, the pressure's variations on the various water bodies caused by oceanic geological structures and the possibility of an internal mechanism in these species to detect soft variations of the magnetic field. We also should not rule out the possibility of the existence of gravimetric variations that indirectly appear as geomagnetic changes. Although the main cause would be from diverse origins, it is possible that we can identify their effects in the geomagnetic field.

Thus we wouldn't expect a direct relationship between the weak magnetic field of the crust, which is at thousands meters deep, and the routes of animals that navigate in a range only a few hundred meters deep from MSL in their migrations. On the other hand this study found something different; there is a fairly common pattern of the migration of turtles to the areas analyzed. It was evaluated that these animals are most likely to navigate through areas where there are regular variations of the CMF. Their movements seem to suffer abrupt changes nearby areas with non-regular variations (generated by magnetic anomalies of the crust). Even making a visual assessment of the routes of these animals and the intensity of the geomagnetic field, this analysis has fundamental mathematical data here presented in supplementary tables (S1 to S14).

The MMF has a very regular behavior around the Earth, big magnetic anomalies only exists at the planet's poles and at southern Atlantic Ocean (South Atlantic Magnetic Anomaly - SAMA). The CMF has variations much more specific (although less in intensity) because of its variable geological evolution. We can't confirm with absolute certainty that the green turtles make strong deviations in their ways as a direct result of the CMF's anomalies, because the CMF's intensities are very low. But it is an acceptable supposition that a biological mechanism detects only soft changes of the vector magnetic field. It is strongly recommended that in future research on telemetry of the green turtles (*Chelonia mydas*)

marine magnetometers would be used to map the intensity of the CMF to the areas of study. The hypothesis that the crust's magnetic field interferes on the navigation mechanisms of the green turtles, as hinted by the present study, could not be confirmed or denied by experimental studies associating biological data, telemetry by satellite and the earth's magnetic field jointly, all these data monitoring in real time.

References

- Åkesson S., Broderick, A. C., Glen, F., Godley, B. J., Lush, P., Papi, F. and Hays, G. C. (2003) Navigation by green turtles: which strategy do displaced adults use to find Ascension Island? *Oikos* **103**, 363-372.
- Alerstam, T. (2003). Animal Behavior: The lobster navigators. *Nature* **421**, 27-28.
- Argos System. (2008). *Argos User's Manual: Worldwide tracking and environmental monitoring by satellite*, CLS. Available at <<http://www.argos-system.org>>, accessed in April 15/2010.
- Balazs, G. H. and Ellis, D. M. (2000). Satellite telemetry of migrant male and female green turtles breeding in the Hawaiian Islands. In: *Abreu-Grobois, F.A., Briseno-Duenas, R., Márquez-Millan, R., and Sarti-Martinez, L. (Compilers), Proceedings of the Eighteenth International Sea Turtle Symposium*. NOAA Technical Memorandum NMFS-SEFSC **436**, 281-283.
- Butler, R. F. (2004). *Paleomagnetism: Magnetic Domains to Geologic Terranes*. Electronic Edition. Department of Chemistry and Physics, 238p. University of Portland, Portland, Oregon, USA.
- Broderick, C. A., Coyne, M. S., Fuller, W. J., Glen, F. and Godley, B. J. (2007). Fidelity and over-wintering of sea turtles. *Proc. R. Soc. B* **274**, 1533-1539.
- Cheng, I. J. (2000). Post-nesting migrations of green turtles (*Chelonia mydas*) at Wan-An Island, Penghu Archipelago, Taiwan. *Mar. Biol.* **137**, 747-754.
- EMM. (2010). *Enhanced Magnetic Model*. National Oceanic and Atmospheric Administration (NOAA) and National Geophysical data Center (NGDC). National Geophysical Data Center, EGC/2, 325 Broadway, Boulder, CO 80303, USA. Available for science researchers at <<http://www.ngdc.noaa.gov/geomag/EMM/emm.shtml>>, accessed Feb. 15/2010.
- Girard C., Sudre J., Benhamou S., Roos, D. and Luschi P. (2006). Homing in green turtles *Chelonia mydas*: oceanic currents act as a constraint rather than as an information source. *Mar. Ecol. Prog. Ser.* **322**, 281-289.
- Gubbins, D. and Herrero-Bervera, E. (2007). *Encyclopedia of Geomagnetism and Paleomagnetism*. 1080p. Ed. Springer-Verlag, New York, USA.
- Godley B. J., Almeida A., Barbosa C., Broderick A. C., Catry P. X., Hays G. C. and Indjai B. (2003) *Using satellite telemetry to determine post-nesting migratory corridors and foraging grounds of green turtles nesting at Poilao, Guinea Bissau*. Report to project donors. Unpublished Report, Marine Turtle Research Group, School of Biological Sciences, University of Wales Swansea, Swansea SA2 8PP, UK.

- Hatase, H., Sato, K., Yamaguchi, M., Takahashi, K. and Tsukamoto, K.** (2006). Individual variation in feeding habitat use by adult female green sea turtles (*Chelonia mydas*): are they obligately neritic herbivores? *Oecologia* **149**, 52–64.
- Hays, G. C., Broderick, A. C., Glen, F., Godley, B. J. and Nichols, W. J.** (2001). The Movement and Submergence Behaviour of Male Green Turtles at Ascension Island. *Marine Biology* **139**, 395-399.
- Hays, C. G., Åkesson, S., Broderick, A. C., Glen, F., Godley, B. J., Papi, F. and Luschi, P.** (2003). Island-finding ability of marine turtles. *Proc. R. Soc. Lond. B*, **270**, Suppl 1, S5-S7.
- Hazel, J.** (2009). Evaluation of fast-acquisition GPS in stationary tests and fine-scale tracking of green turtles. *J. Exp. Mar. Biol. Ecol.* **374**, 58–68.
- Johnsen, S. and Lohmann, K. J.** (2008). Magnetoreception in Animals. *Physics Today*, **61** (3), 29-35.
- Lohmann, K. J.** (2007). Sea Turtles: Navigating with Magnetism. *Current Biology* **17**, N. 3, R104.
- Lohmann, K. J., Lohmann, C. M. F. and Endres, C. S.** (2008). The sensory ecology of ocean navigation. *The Journal of Experimental Biology* **211**, 1719-1728.
- Luschi, P., Hays, G. C., Del Seppia, C., Marsh, R. and Papi, F.** (1998). The navigational feats of green sea turtles migrating from Ascension Island investigated by satellite telemetry. *Proceedings of The Royal Society Biology* **265**, 2279 -2284.
- Luschi, P., Åkesson, S., Broderick, A. C., Glen, F., Godley, B. J., Papi, F. and Hays, G. C.** (2001). Testing the navigational abilities of ocean migrants: displacement experiments on green sea turtles (*Chelonia mydas*). *Behav. Ecol. Sociobiol.* **50**, 528-534.
- Lutz, P. L., Musick, J. A. and Wyneken, J.** (2003). *The Biology of Sea Turtles - Vol II*. CRC Press, Marine Science Series, 472p. New York, USA.
- Matzner, R. A.** (2001). *Dictionary of Geophysics, Astrophysics and Astronomy*. Ed. CRC Press, 526p, USA.
- Papi, F., Luschi, P., Åkesson, S., Capogrossi, S. and Hays, G. C.** (2000). Open-sea migration of magnetically disturbed sea turtles. *The Journal of Experimental Biology* **203**, 3435–3443.
- Plotkin, P.** (2003). *Adult Migrations and Habitat Use. In The Biology of Sea Turtles, Vol. II.* (ed. P. L. Lutz and J. A. Musick), Cap. 8, p.231. Ed. CRC Press, USA.
- Seminoff, J. A., Zárata P., Coyne M., Foley D. G., Parker D., Lyon B. N. and Dutton, P. H.** (2008). Post-nesting migrations of Galápagos green turtles (*Chelonia mydas*) in relation to oceanographic conditions: integrating satellite telemetry with remotely sensed ocean data. *Endangered Species Research* **4**, 57-72.

Surfer 9. (2009). *Surface mapping system manual*. Golden Software. Version 9. Golden, Colorado. Available at <www.goldensoftware.com>, accessed in May 12/2010.

Troëng, S., Evans, D. R., Harrison, E. and Lagueux, C. J. (2005). Migration of green turtles (*Chelonia mydas*) from Tortuguero, Costa Rica. *Marine Biology* **148**, 435-447.

Willis, J., Phillips, J., Muheim, R., Rasilla, F. J. D. and Hobday, A. J. (2009). Spike dives of juvenile southern bluefin tuna (*Thunnus maccoyii*): a navigational role?. *Behavioural Ecology and Sociobiology* **64**, 57-68.

Witt, M. J., Åkesson, S., Broderick, A. C., Coyne, M. S., Ellick, J., Formia, A., Hays, G. C., Luschi, P., Stroud, S. and Godley B. J. (2010). Assessing accuracy and utility of satellite -tracking data using Argos-linked Fastloc-GPS. *Animal Behaviour* **80**, 571-581.

WMM. (2010). World Magnetic Model. *The US/UK World Magnetic Model for 2010/2015*. British Geological Survey, Technical Report, Macmillan S, Quinn J M. 2010. Available at <<http://www.ngdc.noaa.gov/geomag/WMM/>>, accessed in April 01/2010.

CAPÍTULO 5

**O campo de anomalias magnéticas terrestres como parâmetro
em movimentos oceânicos de tartarugas-verdes (*Chelonia mydas*)**

Artigo a ser enviado ao periódico

The Journal of Experimental Biology (JEB)

The Company of Biologists Limited

<http://jeb.biologists.org/>

O campo de anomalias magnéticas terrestres como parâmetro em movimentos oceânicos de tartarugas-verdes (*Chelonia mydas*)

Guilherme P. da Silva¹ e Tereza C. M. de Araújo²

^{1,2} Laboratório de Oceanografia Geológica (LABOGEO), Departamento de Oceanografia, Universidade Federal de Pernambuco (UFPE). Centro de Tecnologia e Geociências. Cidade Universitária, CEP 50670-901. Recife-PE. Brasil. Telefone: +55(81) 2126.8227 . Fax: +55(81) 2126. 8227. Site Internet: www.pppo.ufpe.br.

¹ e-mail: guilherme.pereirasilva.ufpe.br ² e-mail: tcma@ufpe.br

Resumo

O campo magnético natural terrestre atua como um agente protetor de fortes ventos solares, que atingem nosso planeta, tornando-o um agente importante no equilíbrio do ambiente marinho. Foi realizado um estudo da variabilidade do campo magnético gerado pela crosta terrestre em duas regiões de migração de tartarugas marinhas verdes (*Chelonia mydas*) próximas à ilhas oceânicas. Dois modelos matemáticos, de abrangência global, foram utilizados na determinação matemática deste campo, o "World Magnetic Model" (WMM) e o "Enhanced Magnetic Model" (EMM). Registros de telemetria via satélite de tartarugas marinhas, monitoradas nas proximidades da Ilha de Ascensão (Oceano Atlântico) e da Ilha Europa (canal de Moçambique – África), foram reconstruídos digitalmente e, a seguir, comparados ao campo de anomalias magnéticas correspondentes. A análise mostra a existência de anomalias magnéticas próximas às posições geográficas ocupadas pelos animais e a preferência destes animais por regiões de menor variabilidade. Uma avaliação numérica mostra que 85,2% dos animais (próximos à Ilha de Ascensão) e 81% (próximos a Ilha Europa) posicionam-se entre as intensidades de -50 e +50 nanoTesla. Assim, existem fortes indícios de que estes animais utilizem uma "zona de conforto", do campo de anomalias magnéticas, em seu deslocamento oceânico. Esta avaliação reforça a tese de que animais marinhos utilizem o campo magnético terrestre como parâmetro de navegação por longas distâncias, tendo como preferência as regiões de menor variabilidade.

Palavras-chave: Oceanografia. Geomagnetismo. Tartarugas verdes. Telemetria. Migração.

Abstract

The Earth's magnetic field acts as a protective agent of strong solar winds that reach to our planet, making it a important player in the marine environment equilibrium. Was conducted a study on magnetic field variability generated by the Earth's crust, relative to regions of migrating green turtles (*Chelonia mydas*) near two oceanic islands. Two mathematical models of global scope determining the magnetic field were used, the WMM (World Magnetic Model) and the EMM (Enhanced Magnetic Model). Records satellite telemetry of turtles monitored in the vicinity of Ascension Island (Atlantic Ocean) and the island Europe (Mozambique Channel - Africa) were reconstructed digitally and then compared to the corresponding magnetic anomaly field. The analysis shows the existence of magnetic anomalies close to the geographic locations where animals and their option for regions with less variability. A numerical evaluation shows that 85.2% (for animals near Ascension Island) and 81% (for animals island near Europe) are positioned between the intensities +50 and -50 nanoTesla. Thus, there is strong evidence of these animals use a "comfort zone" of this field in its movement, supporting the argument that marine animals use the Earth's magnetic field as a parameter for ocean navigation.

Keywords: Oceanography. Geomagnetism. Green turtles. Telemetry. Migration.

Introdução

O campo magnético natural terrestre é gerado por complexos movimentos de cargas elétricas existentes no núcleo secundário do planeta, em um processo chamado geodínamo autossustentável. Este campo estende-se por milhares de quilômetros além da atmosfera, compondo um escudo protetor do planeta, chamado magnetosfera. A ação do campo magnético sobre o ambiente terrestre é constante, podendo ser evidenciada por registros em eras passadas, através do estudo do Paleomagnetismo de rochas (Campbell, 2003; Butler, 2004; Backus *et al.*, 2005; Gubbins e Herrero-Bervera, 2007).

Nosso planeta produz um campo mais intenso (*Main Field*), gerado pelo núcleo, chamado de campo magnético principal (CMP), com intensidade variando entre 22.000 e 60.000 nanoTesla (nT). Além deste, existe o campo gerado por rochas da camada superficial da litosfera (variando entre centenas de nT), chamado campo magnético da crosta (CMC). Também ocorrem variações irregulares e de curta duração do campo magnético externo (CME), gerado pela ação de tempestades magnéticas advindas principalmente do Sol e do espaço longínquo (Kearey, 2002; Kono, 2009; WMM, 2012).

Pode-se determinar a intensidade e a direção do campo magnético terrestre através de modelos globais, que incorporam medições realizadas por satélites (Champ, 2012; Orsted, 2010), por estações geomagnéticas (Intermagnet, 2010), além daqueles obtidos por expedições aeromagnéticas e oceanográficas (Langel e Hinze, 2011). Dentre os principais modelos matemáticos utilizados, estão o “*World Magnetic Model*” (WMM-Modelo Magnético Mundial) e o “*Enhanced Magnetic Model*” (EMM-Modelo do Campo Magnético Ampliado). Eles fornecem as componentes do vetor de campo magnético (Fig. 1) designadas por campo total (F), vertical (Z), horizontal (H), leste-oeste (Y), norte-sul (X), inclinação magnética (I) e declinação magnética (D).

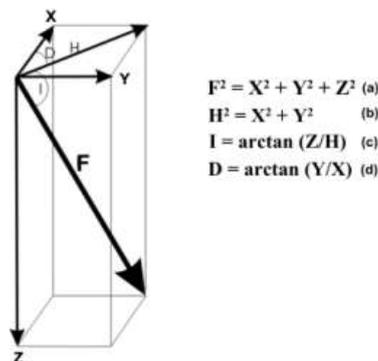


Fig. 1. Componentes do campo geomagnético. O vetor campo total (F) pode ser decomposto em coordenadas cartesianas (X, Y, Z e H) e direcionais (I e D), relacionadas pelas equações (a, b, c e d). Fonte: Butler (2004).

Recentes estudos identificaram uma percepção magnética em quelônios marinhos, em grandes peixes pelágicos e em crustáceos, embora as evidências ainda sejam insuficientes para uma afirmação conclusiva (Lohmann *et al.*, 1999; Luschi *et al.*, 2001; Alerstam, 2003; Lohmann *et al.*, 2008; Willis *et al.*, 2009). A tartaruga-verde (*Chelonia mydas* – Linnaeus, 1758) é um dos animais marinhos passível de orientação magnética (Lohmann, 2007; Hazel, 2009). Uma das áreas de migração desta espécie está na Ilha de Ascensão (território britânico de Santa Helena, no Oceano Atlântico Sul), de onde os animais migram com destino à costa do Brasil, tendo sido acompanhados através de telemetria via satélite (Hays *et al.*, 2001a; Hays *et al.*, 2001b; Argos System, 2008). Estes animais percorrem distâncias da ordem de 2.000 km no oceano, possuindo uma regularidade migratória entre 2 e 4 anos; neste período as fêmeas sempre retornam às praias onde nasceram (Luschi *et al.*, 1998; Wyneken, 2001; Lutz *et al.*, 2003). Segundo Lohmann *et al.* (2004) e Lohmann (2007) a investigação dos parâmetros que regem estas grandes movimentações é essencial para a elucidação do processo de reprodução e da dinâmica migratória das tartarugas-verdes.

Outro local de investigação da movimentação oceânica desta espécie é a Ilha de Europa. Esta pequena ilha francesa, localizada ao Sul do Canal de Moçambique – África, dependência das terras Austrais e Antárticas, é um local de desova, sendo importante para a preservação da espécie. A movimentação de tartarugas-verdes foi acompanhada via satélite por Girard *et al.* (2006), relacionando sua migração às influências de correntes oceânicas.

No presente trabalho, a relação entre o campo de anomalias magnéticas da crosta terrestre e posições geográficas ocupadas por tartarugas marinhas verdes (*Chelonia mydas*) é investigada, tanto para a região próxima à Ilha de Ascensão (Oceano Atlântico), como para a Ilha de Europa (Canal de Moçambique - África).

Material e métodos

Inicialmente, foi determinada a componente campo total (F), relativa ao campo magnético ampliado, utilizando-se o software `emm_sph_grid_windows` (em linguagem C⁺⁺), fornecido pelo modelo EMM (EMM, 2010). Já a componente relativa ao campo principal, determinada com o software `wmm_grid.c`, do modelo WMM (WMM, 2010). Ambas as componentes nos limites geográficos das regiões estudadas por Luschi *et al.* (1998) e Girard *et al.* (2006). A intensidade do campo de anomalias magnéticas foi obtida pela subtração da intensidade do campo principal à do campo ampliado, referente a cada ano de realização das pesquisas, e sempre na altitude do nível médio do mar.

Os mapas de deslocamentos oceânicos das tartarugas-verdes, as quais foram acompanhadas por telemetria via satélite, foram extraídos de dois artigos científicos. O primeiro foi realizado por Luschi *et al.* (2008), abrangendo um grupo de seis espécimes (Fig. 2), que retornavam da postura de ovos na Ilha de Ascensão, no Atlântico Sul, em direção ao Brasil. Destes seis animais, cinco (Fig. 2A) completaram o percurso migratório, e um deles (espécime A na Fig. 2B) perdeu contato por satélite no início do trajeto, não será analisado. Neste estudo a rota de cada um dos cinco espécimes (B, C, D, E e F) foi reconstruída digitalmente, e sua projeção Mercator feita com o software SURFER11 (Golden Software, 2012). Uma projeção do campo de anomalias magnéticas, para a região abrangida pelo mapa da Fig. 2B (limite de latitudes entre 6°S e 10°S e longitudes entre 12°W e 20°W), foi combinada com as projeções individuais e coletiva dos cinco espécimes. Foi verificada a variabilidade conjunta da intensidade do campo de anomalias para cada um dos pontos geográficos ocupados pelos cinco espécimes. A análise restringiu-se à área da Fig. 2B, para melhor visualização tanto do comportamento do campo de anomalias quanto das variações de direcionamento de cada espécime.

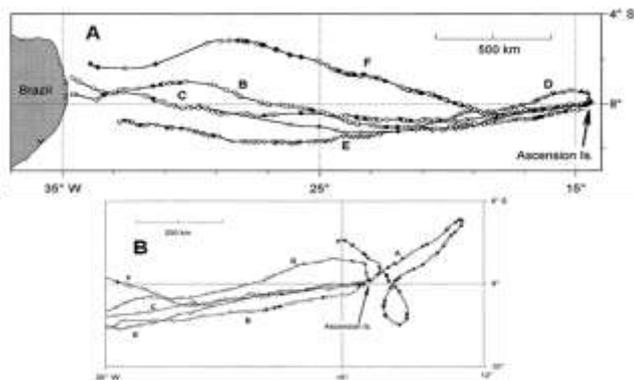


Fig. 2. Movimentos migratórios em larga escala (A) e entorno (B) de seis tartarugas-verdes (*Chelonia mydas*), da Ilha de Ascensão, no Oceano Atlântico Sul, em direção ao Brasil. Fonte: Luschi *et al.* (1998).

A metodologia foi repetida para o trabalho realizado por Girard *et al.* (2006), que registrou o posicionamento de três espécimes em processo de nidificação, na isolada Ilha de Europa, ao Sul do canal de Moçambique, na África. As posições geográficas dos espécimes foram reconstruídas digitalmente para o espécime chamado T2 (Fig. 3A), T1 (área sombreada da Fig. 3B) e T3 (área sombreada da Fig. 3C). Uma análise comparativa foi realizada em regiões onde se tem a posição de cada espécime demarcada (pontos pretos na Fig. 3). O método de aproximação numérica utilizado foi o da crigagem (Kriging), e a forma de contorno por isolinhas coloridas (Rainbow), incluindo uma escala de intensidades por cores.

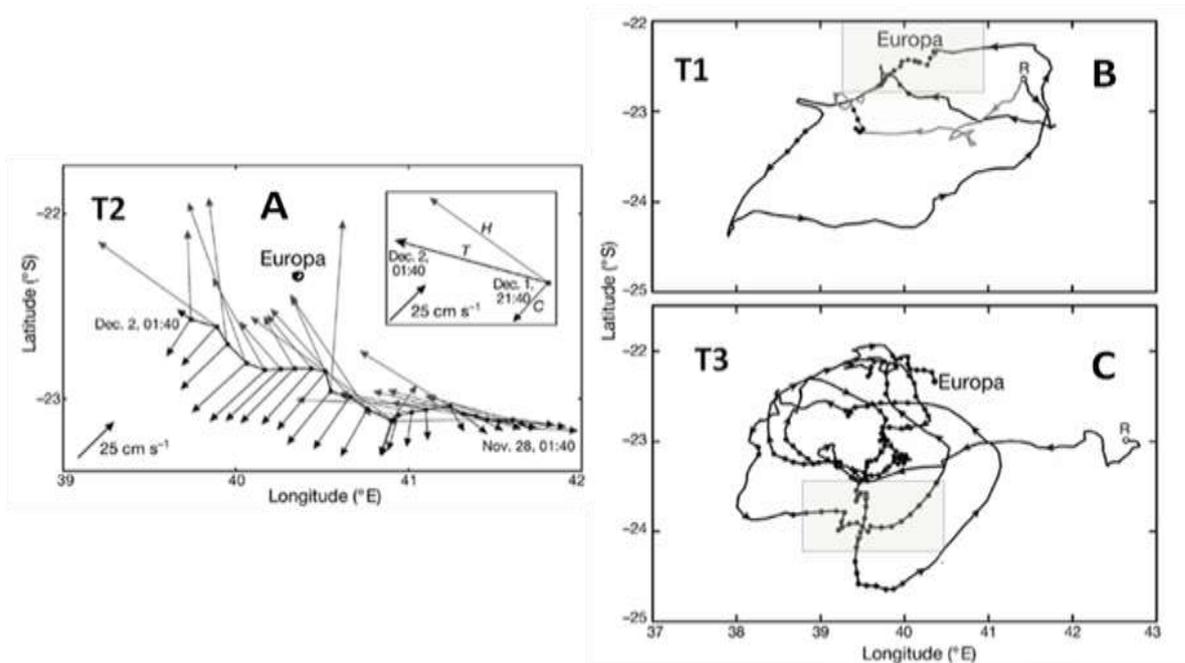


Fig. 3. Áreas de estudo da movimentação de três espécimes de tartarugas-verdes ao redor da Ilha de Europa, no canal de Moçambique. Os espécimes T1 (B) e T3 (C) foram avaliados nas respectivas áreas sombreadas, enquanto o espécime T2 (A) na área completa da figura. Fonte: Girard *et al.* (2006).

A seguir, foram construídos gráficos e tabelas, que representam a intensidade de campo total (F) das anomalias magnéticas, em todos os pontos geográficos nos quais os espécimes estiveram presentes. Assim, foi possível avaliar o quanto variou esta grandeza (entre intensidades máximas, mínimas e médias) ao longo de todo o percurso.

Uma discussão foi levantada, acerca da disposição destas anomalias magnéticas e a sequência de posições geográficas ocupadas pelos animais. O comportamento conjunto dos animais foi investigado, em busca de um padrão comum.

Resultados e Discussão

Projetando as posições geográficas contínuas (reconstruídas digitalmente a partir da Fig. 2B) de cinco espécimes de tartarugas-verdes por Luschi *et al.* (1998), sobre a distribuição do campo de anomalias magnéticas da crosta, obteve-se a representação da Fig. 4. Observa-se que as posições geográficas dos espécimes (B, C, D, E e F) em direção à costa brasileira, estão próximas a anomalias magnéticas (regiões de variabilidade irregular do campo).

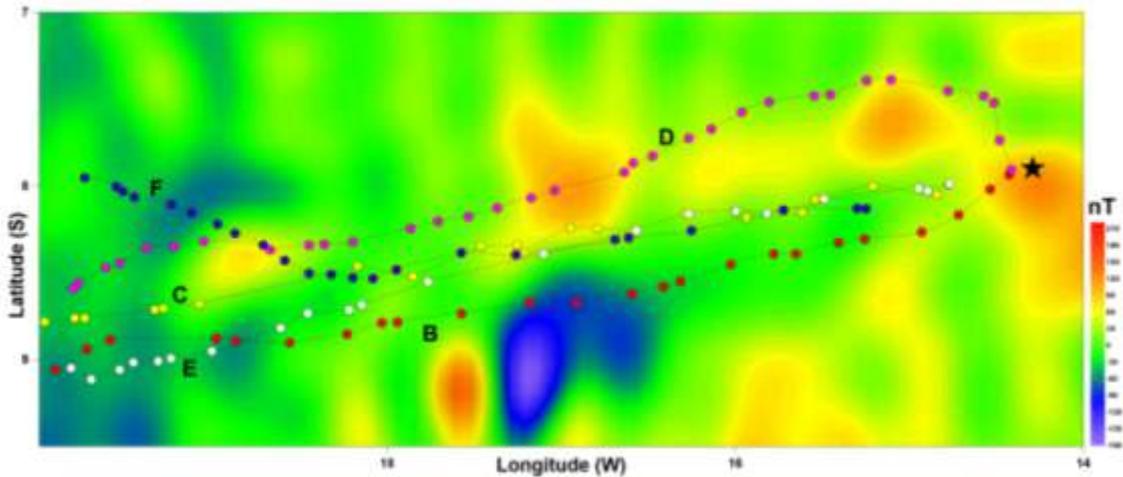


Fig. 4. Projeção Mercator do campo de anomalias magnéticas, próximo à Ilha de Ascensão (estrela preta), comparadas aos movimentos de cinco tartarugas-verdes (B, C, D, E e F), descritas por Luschi *et al.* (1998).

Para uma melhor visualização dos trajetos de cada espécime mostrado na Fig. 4, cada um deles está representado separadamente em mapas de campo geomagnético (Fig. 5). Observa-se que os espécimes descrevem posições contínuas por regiões contendo anomalias magnéticas, parecendo evitar sua aproximação. Observa-se uma preferência destes espécimes por regiões de menor variabilidade geomagnética.

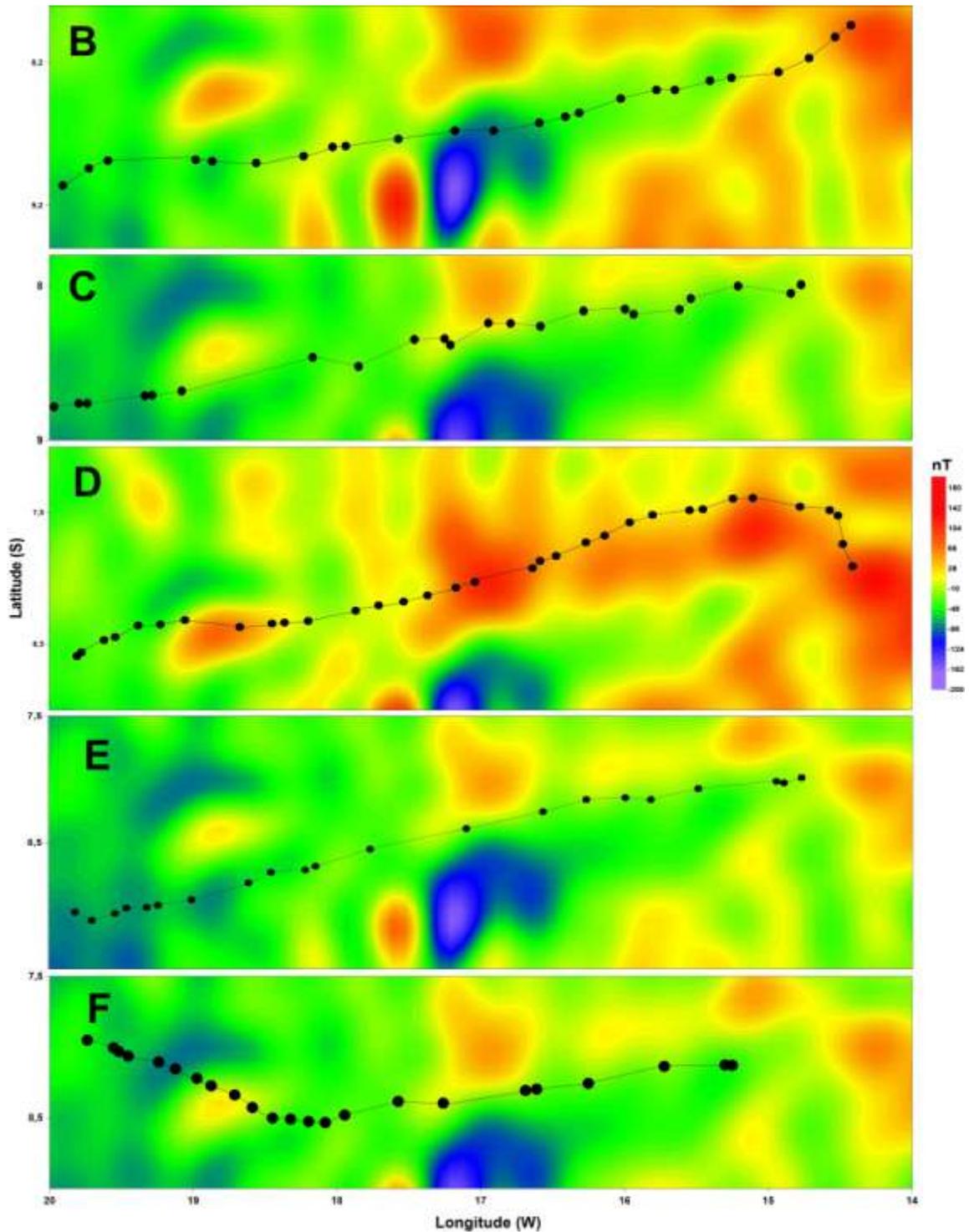


Fig. 5. Deslocamentos oceânicos de cinco espécimes de tartarugas marinhas (B, C, D, E e F), descritas por Luschi et. al. (1998), e projetado sobre o campo de anomalias magnéticas, para o nível médio do mar.

Visualmente, observa-se que os movimentos destes animais são no sentido de contornar regiões de maior variabilidade geomagnética, porém uma análise numérica torna-se necessária. A intensidade de campo para cada um dos pontos, destes cinco espécimes, foram

plotadas contra as contínuas posições do avanço dos animais em migração, obtendo-se assim, o gráfico da Fig. 6.

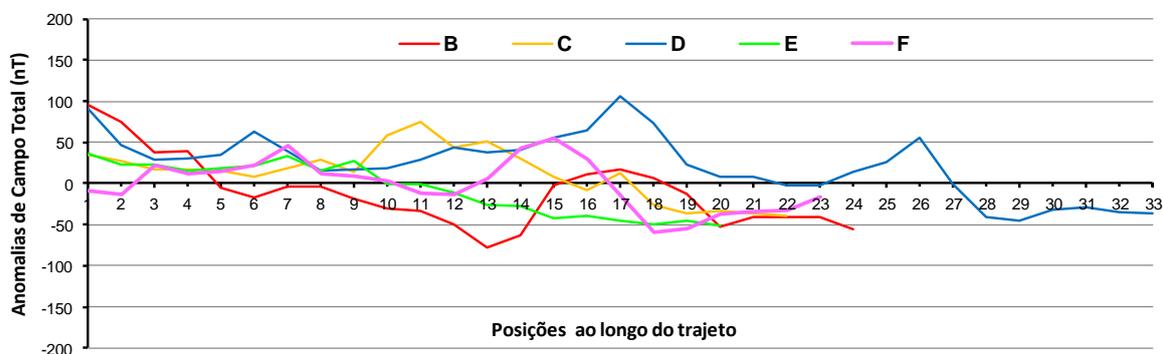


Fig. 6. Intensidade do campo de anomalias magnéticas, nas sucessivas posições geográficas ocupadas por cinco espécimes de tartarugas-verdes descritos por Luschi *et al.* (1998). Cada animal é representado por uma cor.

As intensidades máximas e mínimas, para cada um dos espécimes, estão representadas numericamente na Tabela 1.

Tabela 1. Intensidades máximas (F_{Max}) e mínimas (F_{Min}), do campo de anomalias magnéticas, referente ao número de (n) posições, ocupadas por cinco espécimes de tartarugas marinhas acompanhadas por Luschi *et al.* (1998).

Espécime	n	F_{Max} (nT)	F_{Min} (nT)
B	24	96,2	-78,5
C	22	74,6	-38,9
D	33	105,6	-45,8
E	20	36,6	-50,8
F	23	54,8	-59,9

As intensidades máximas e mínimas, para todos os espécimes, variaram em torno de +105,6 e -78,5 nT, podendo indicar uma faixa delimitada em intensidade, na qual estes animais navegam. Ao todo (somatório de n, na Tabela1) foram registrados 122 pontos de todos os trajetos, sendo que 85,2% (104 posições) deles estão entre -50 e +50 nT. Se considerar-se o número mínimo de posições (20 para o espécime E), para todos os espécimes; de um total de 100 posições, 83% estão entre -50 e +50 nT. Assim, pode-se sugerir a existência de uma zona de conforto, em torno de -50 e +50 nT, indicando uma região específica de menor variabilidade, em intensidade de campo magnético, para o deslocamento destes animais.

A intensidade do campo magnético de anomalias sobreposto a posições geográficas digitalizadas das três tartarugas-verdes estudadas por Girard *et al.* (2006), estão representadas nas Figuras 7, 8 e 9, respectivamente.

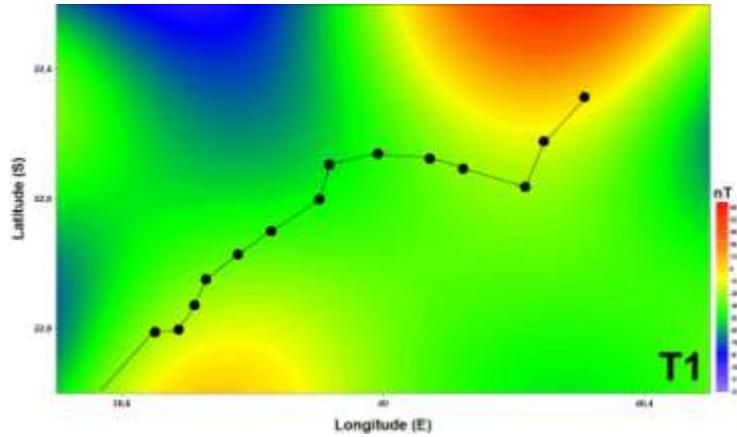


Fig. 7. Movimentação oceânica do espécime T1, acompanhado via sinal de satélite por Girard *et al.* (2006). Foram registrados 14 posições da trajetória, representadas em projeção Mercator.

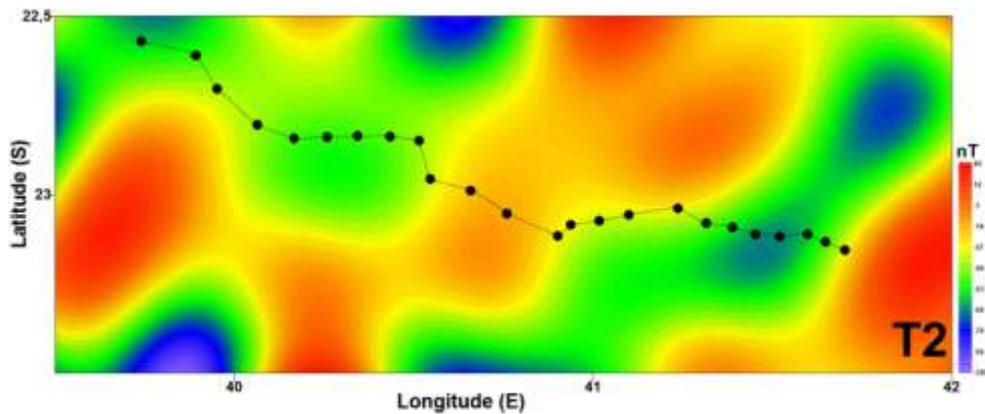


Fig. 8. Movimentação oceânica do espécime T2, registrada por Girard *et al.* (2006). Foram plotadas 24 posições da trajetória, em projeção Mercator.

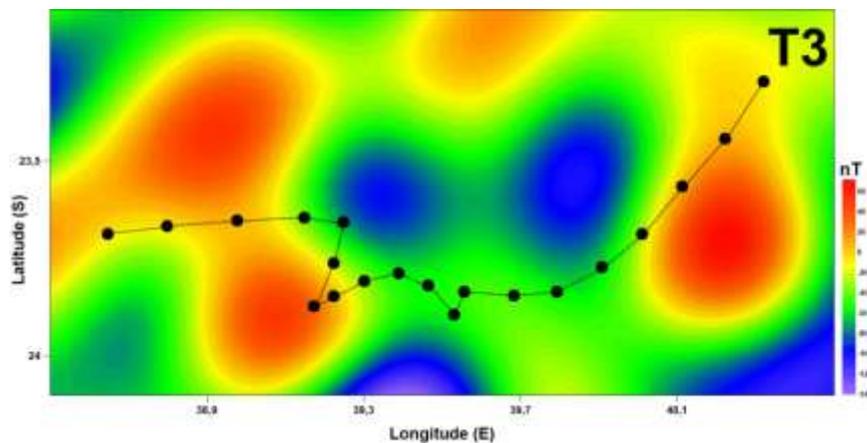


Fig. 9. Movimentação oceânica do espécime T3, registrada por Girard *et al.* (2006). Foram plotadas 20 posições da trajetória, em projeção Mercator.

As intensidades do campo, ao longo das sucessivas posições nas trajetórias dos animais, estão representadas na Figura 10.



Fig. 10. Intensidade do campo de anomalias magnéticas nas posições geográficas ocupadas por três espécimes de tartarugas descritas por Girard *et al.* (2006). Cada animal é representado por uma cor.

Mais uma vez pode-se observar que existe uma região de conforto, aproximadamente entre -50 e +50 nT na intensidade, enquanto que para a região completa (abrangendo todos os animais) varia entre -200 e +200 nT. As intensidades máximas, mínimas e médias, relativas a cada espécime, estão representadas na Tabela 2.

Tabela 2. Intensidades máximas e mínimas, do campo de anomalias magnéticas, referentes ao número (n) de posições para três espécimes de tartarugas marinhas acompanhadas por Girard *et al.* (2006).

Espécime	n	F _{Max} (nT)	F _{Min} (nT)
T1	14	56,4	5,0
T2	24	-11,9	-64,2
T3	20	75,2	-14,0

Verifica-se, através da Tabela 2, que as intensidades variaram de -64,2 a +75,2 nT para todos os animais (58 posições no total). Destes 58 pontos, 47 estão entre -50 e +50 nT, o que equivale a 81% do total. Se considerar-se, para todos os espécimes, o mesmo número de posições iniciais (referentes ao menor número, 14 posições para T1), teremos 34 pontos em um total de 42, o que mostra ser de 81%, referente todas as posições, entre -50 e +50 nT. Assim, pode-se verificar que a maior parte dos pontos por onde os animais estiveram (81%), estão em uma faixa entre -50 e +50 nT, em intensidade do campo de anomalias magnéticas.

Estes dois estudos de caso apresentam indicativos de que as tartarugas marinhas fazem uso de uma “zona de conforto geomagnética”, do campo de anomalias da crosta. A banda de intensidades, para os dois casos, varia entre -50 e +50 nT.

Conforme já constatado por Silva e Araújo (2011), ao realizarem estudos sobre migração de tartarugas marinhas, em diversas regiões oceânicas do planeta, estes animais descrevem trajetos que evitam áreas contendo fortes variações do campo magnético. Lohmann (2010), assim como no presente estudo, mostrou que sutis variações do campo, da mesma ordem de intensidade das anomalias do campo da crosta, são perceptíveis pelas tartarugas marinhas, porém estes foram obtidos em laboratório e não em ambiente natural.

Discussões como esta levam à formulação de várias hipóteses sobre os possíveis mecanismos de navegação das tartarugas marinhas. Dentre elas, pode-se destacar a possibilidade de haver uma forma orgânica de registro magnético nestes animais. Esta hipótese, chamada de “mapa magnético”, discutida por Lohmann (2010), Putmann *et al.* (2011) e Johnsen e Lohmann (2008), indica a possibilidade de ser o magnetismo do campo principal parte de um complexo conjunto de parâmetros, como luz e calor, integrantes da orientação oceânica. A indução eletromagnética, modelo não aplicado à tartaruga marinha, já identificada em outros animais, como em tubarões por O’Connell (2011), indica que estes animais possuem sensibilidade aos campos elétricos e magnéticos, captados ao redor do focinho (ampolas de Lorenzini), em intensidades tão pequenas quanto as do campo magnético natural.

Estudos sobre a magneto-recepção por células animais (Eder *et al.*, 2012) mostram a existência de sensores celulares, compostos por minerais micrométricos de magnetita (mineral magnético), capazes de registrar intensidades diminutas de campo. Embora a pesquisa ainda seja polêmica em muitos casos, já é possível identificar-se a capacidade magnética de uma única célula, através da medição de seu momento de dipolo magnético, e sua visualização por poderosos microscópios eletrônicos de varredura. A magneto-recepção em pássaros já é detectada e muito estudada (Kirschvink *et al.*, 2010). Pombos migram por longas distâncias e como possuem cristais de magnetita no bico, podem estar se beneficiando de um sentido magnético, em sua movimentação por longas distâncias.

A descrição de processos envolvendo o magnetismo natural e sua percepção por animais ainda está em fase de construção, porém acredita-se que a investigação científica baseada na diversidade de metodologias será fundamental na elucidação deste mistério. O presente trabalho introduz o posicionamento de anomalias magnéticas, geradas pela crosta terrestre, como um dos parâmetros utilizados por tartarugas marinhas na orientação oceânica.

Referências

- Alerstam, T. (2003). **Animal behavior: The lobster navigators**. Nature 421, 27-28. Disponível em <<http://www.nature.com/nature/journal/v421/n6918/full/421027a.html>>. Acesso em 15/05/2010.
- Argos System. (2008). Worldwide Tracking and Environmental Monitoring by Satellite. **Argos User's Manual**. Disponível em <<http://www.argos-system.org>>. Acesso em 15/04/2010.
- Backus, G.; Parker, R. e Constable, C. (2005). **Foundations of Geomagnetism**. Cambridge University Press, 384p, Oxford. ISBN 10: 0521017335.
- Butler, R.F. (2004). **Paleomagnetism: Magnetic Domains to Geologic Terranes**. Electronic Edition. Department of Chemistry and Physics. University of Portland. Portland, Oregon. USA.
- Campbell, W.H. (2003). **Introduction to Geomagnetic Fields**. Cambridge University Press, 179p.
- Champ. (2012). Challenging Minisatellite Payload. **CHAMP project Organization**. Disponível em <<http://www-app2.gfz-potsdam.de/pb1/op/champ/>>. Acesso em 15/04/2012.
- Eder, S.H.K.; Cadioub, H.; Muhamadb, A.; McNaughtonb, P.A.; Kirschvinkc, J.L. e Winklhofer, M. (2012). **Magnetic Characterization of isolated candidate vertebrate magnetoreceptor cells**. Proceedings of the National Academy of Sciences. Disponível em <<http://www.pnas.org/content/109/30/12022>>.
- EMM. (2010). Enhanced Magnetic Model. **Modelo do Campo Magnético Ampliado Terrestre**. NOAA (National Oceanic and Atmospheric Administration). National Geophysical data Center. Disponível em <<http://www.ngdc.noaa.gov/geomag/EMM/emm.shtml>>. Acesso em 15/02/2010.
- Girard, C.; Sudre, J.; Benhamou, S.; Roos, D. e Luschi P. (2006). **Homing in green turtles *Chelonia mydas*: oceanic currents act as a constraint rather than as an information source**. Mar. Ecol. Prog. Ser. 322, 281-289.
- Golden Software. (2012). **SURFER11: Surface Mapping System**. Version 11. Golden, Colorado. Disponível em <www.goldensoftware.com>, USA. Acesso em 12/03/2012.
- Gubbins, D. e Herrerobervera, E. (2007). **Encyclopedia of Geomagnetism and Paleomagnetism**. Ed. Springer-Verlag, New York, 1080p.
- Hays, G.C.; Dray, M.; Quaife, T.; Smyth, T.J.; Mironnet, N.C.; Luschi, P.; Papi, F. e Barnsley, M.J. (2001a). **Movements of migrating green turtles in relation to AVHRR derived sea surface temperature**. International Journal on Remote Sensing. Vol. 22, no. 8, 1403-141. Em <<http://www.informaworld.com/smpp/content~db=all~content=a713861219>>. Acesso em 15/02/2010.

Hays, G.C.; Broderick, A.C.; Glen, F.; Godley, B.J. e Nichols, W.J. (2001b). **The Movement and Submergence Behavior of Male Green Turtles at Ascension Island**. In *Marine Biology* 139:395-399. Disponível em < http://www.seaturtle.org/mtrg/pubs/hays_jeb01.pdf>. Acesso em 15/06/2010.

Hazel, J. (2009). **Evaluation of fast-acquisition GPS in stationary tests and fine-scale tracking of green turtles**. In *JEMBE* 374 58–68.

Intermagnet. (2010). **International Real-time Magnetic Observatory Network**. The global network of observatories, monitoring the Earth's magnetic field. Disponível em <http://www.intermagnet.org/Welcom_e.html>. Acesso em 15/02/2010.

Johnsen, S. e Lohmann, K.J. (2008). **Magnetoreception in animals**. *Phys. Today* 61 (3), 29–35.

Kearey, P.; Brooks, M. e Hill, Y. (2002). **An Introduction to Geophysical Exploration**. Blackwell Science Ltd, 281p.

Kirschvink, J.L.; Winklhofer, M. e Walker, M.M. (2010). **Biophysics of magnetic orientation: strengthening the interface between theory and experimental design**. *J. R. Soc. Interface* (2010) 7, S179–S191. doi:10.1098/rsif.2009.0491.

Kono, M. (editor). **Geomagnetism: Treatise on Geophysics**. Elsevier Science and Technology, 608p, ISBN 13:9780444534613. Ed. Oxford (GB), 2009.

Langel, R.A. and Hinze, W.J. (2011). **The Magnetic Field of the Earth's Lithosphere: The Satellite Perspective**. Cambridge University Press, Cambridge, 450p.

Lohmann, K. J.; Hester, J.T. e Lohmann, C.M.F. (1999). **Long-distance navigation in sea turtles**. *Ethology Ecology & Evolution* 11:1-23.

Lohmann, J.; Lohmann, C.M.F.; Ehrhart, L.M.; Bagley, D.A. e Swing, T. (2004). **Geomagnetic map used in sea-turtle navigation**, in *NATURE, USA*, vol. 428. Disponível em <<http://www.unc.edu/depts/geomag/PDFGeomag/Turtlemap2004.pdf>> Acesso em 10/04/2009.

Lohmann, K.J. (2007). **Sea Turtles: Navigating with Magnetism**. *Current Biology*. Volume 17, R102-R104.

Lohmann, K.J.; Lohmann, C.M.F. e Endres, C.S. (2008). **The sensory ecology of ocean navigation**. *The Journal of Experimental Biology*. 211, 1719-1728. Published by The Company of Biologists.

Lohmann, K.J. (2010). **Magnetic-field perception – Animal Behavior**. *Nature*, Vol. 464, 1140-1142.

Luschi, P.; Hays, G.C.; Del Seppia, C.; Marsh, R. e Papi, F. (1998). **The navigational feats of green sea turtles migrating from Ascension Island investigated by satellite telemetry**, *Proceedings of The Royal Society Biology*, 265, 2279 a 2284, London. Disponível em < http://www.swansea.ac.uk/bs/turtle/reprints/paolo_prs98.pdf>. Acesso em 11/05/2010.

Luschi, P.; Åkesson, S.; Broderick, A.C.; Glen, F.; Godley, B.J.; Papi, F.; Hays, G.C. (2001). **Testing the navigational abilities of ocean migrants: displacement experiments on green sea turtles (*Chelonia mydas*)**. Behav. Ecol. Sociobiol. 50, 528. Disponível em http://www.swansea.ac.uk/bs/turtle/reprints/paolo_bes01.pdf. Acesso em 11/05/2010.

Lutz, P.L.; Musick, J.A. e Wyneken, J. (2003). **The Biology of Sea Turtles - Vol. II**. The CRC Press, Marine Science Series, 472p, New York.

Matzner, R.A. (2001). **Dictionary of Geophysics, Astrophysics and Astronomy**. Ed. CRC Press, ISBN 0-8493-2891-8, 526p, USA.

O'Connell, C.P.; Gruber, S.H.; Abel, D.C.; Stroud, E.M. e Rice, P.H. (2011). **The responses of juvenile lemon sharks, *Negaprion brevirostris*, to a magnetic barrier**. Ocean Coast. Manag. 54(3): 225-230.

Örsted. (2010). **The Örsted Satellite**. National Space Institute of Denmark. Department of Informatics and Mathematical Modeling and the Danish National Space Center. Disponível em <http://www.space.dtu.dk/English/Research/Projects/Oersted.aspx>. Acesso em 30/04/2010.

Putman, N.F.; Endres, C.S.; Lohmann, C.M.F. e Lohmann, K.J. (2011). **Longitude Perception and Bicoordinate Magnetic Maps in Sea Turtles**. Current Biology, 21, 463-466.

Silva, G.P e Araújo, T.C.M. (2011). **Green Turtles and the Crust's magnetic Field**. Ciencia y Tecnología del Mar, Vol. 34 (1), 5-17. Disponível em http://www.cona.cl/ctmol2/vol34_1_2/indice-general.htm. Acesso em 12/06/2013.

Willis, J.; Phillips, J.; Muheim, R.; Rasilla, F.J.D. e Hobday, (2009). **A.J. Spike dives of juvenile southern bluefin tuna (*Thunnus maccoyii*): a navigational role?**. Behavioural Ecology and Sociobiology, Volume 64, Number 1, November.

WMM. (2010) **The US/UK World Magnetic Model for 2010-2015**. British Geological Survey, Technical Report, Susan Macmillan and John M. Quinn, England. Disponível em <http://www.ngdc.noaa.gov/geomag/WMM/>. Acesso em 30/04/2012.

Wyneken, J. (org.). (2001). **The Anatomy of Sea Turtles**. NOAA - Technical Memorandum NMFS-SEFSC-470, 180p. Disponível em http://www.sefsc.noaa.gov/PDFdocs/TM_470_Wyneken_spanish.pdf. Acesso em 30/04/2010.

CAPÍTULO 6

**The magnetic field of the oceanic crust as a parameter to the movements of
green turtles (*Chelonia mydas*) in the region of the Galápagos Archipelago
(Ecuador)**

Artigo a ser enviado ao periódico

Endangered Species Research

Inter-Research

www.int-res.com

The magnetic field of the oceanic crust as a parameter to the movements of green turtles (*Chelonia mydas*) in the region of the Galápagos Archipelago (Ecuador)

Guilherme P. da Silva, Jeffrey Seminoff, Tereza C. M. de Araujo e Paulo de Barros Correia

Author for correspondence (guilherme.pereirasilva@ufpe.br)

Abstract

A study was carried through comparing the movements of green turtles (*Chelonia mydas*) and the intensity of the magnetic field of the oceanic crust in the region of the Galápagos Archipelago (Ecuador). Relations between the geographic distribution of the oceanic tracks of these animals, monitored by satellite, and the variations in the intensity of the geomagnetic field at mean sea level are investigated. The worldwide geomagnetic models WMM2010 and EMM2010 were used, as well as maps containing routes of the turtles. Magnetic anomalies generated by the field crust were found, that if overlapped with the tracks of these animals, inside the same geographical limits, showed many approximations among them. It was verified that all the 07 analyzed specimens navigated by regions between these geomagnetic anomalies. A mathematical evaluation shows that the intensity of the crust's magnetic field at the positions occupied by these animals is 99.4%, on average, relative to the mean intensity at an around area. Therefore there are strong evidences that these animals use regions with non regular variations (anomalies) of the oceanic crust magnetic field as natural markers in their oceanic navigation.

Key words: Green turtles, geomagnetism, Galápagos, magnetic anomalies, navigation.

Introduction

Studies point out the natural magnetic field of the Earth as a possible parameter in the orientation of marine animals; such as specimens of turtles (Walker *et al.* 1997; Luschi *et al.* 2001; Philips *et al.* 2001; Lohmann *et al.* 2008a; Lohmann *et al.* 2008b), great pelagic fishes (Willis *et al.* 2009) and crustaceans (Alerstam 2003). Evidences indicate that the green turtles (*Chelonia mydas*) are sensitive to local magnetic conditions (Lohmann 2007). These animals are found in tropical and subtropical environments in the Atlantic, Pacific and Indian Oceans (Plotkin 2003). The oceanic movements of these animals have been followed in various parts of the world using satellite telemetry. These animals travel thousands of kilometers in regular migrations (Papi *et al.* 1995 and Luschi *et al.* 1998), where the females return regularly to the places where they were born (Lutz *et al.* 2003). Johnsen and Lohmann (2008) reported that there is a set of environmental factors influencing on the duration and navigation mechanisms of these turtles, complex mechanisms that are not entirely clear. Research also points out to a possible influence of the marine currents in the movements of this species in route to nesting sites (Hays *et al.* 2003).

Investigators, using the satellite telemetry system called Argos (Argos System 2008), followed the migration of the green turtles at Ascension Island (Luschi *et al.* 1998; Papi *et al.* 2000; Åkesson *et al.* 2003; Witt *et al.* 2010), in the Mediterranean Sea (Broderick *et al.* 2007), on the coast of Africa (Girard *et al.* 2006), in the Sea of China (Cheng 2000), and in the Galápagos Archipelago (Seminoff *et al.* 2008), among other marine regions.

The researchers investigated the migratory tracks of these animals and the usual oceanographic variables, such as sea surface temperature, chlorophyll level, and variables of the oceanic currents, among others. But up to now no direct and conclusive relation has been found, about the predictability of these movements or even the mechanism that starts them. The hypothesis of a possible relation between these migratory movements and the variables of the geomagnetic field is plausible, but is still in the investigation phase.

According to the current geophysical model, the terrestrial magnetic field is composed by the Main Magnetic Field (MMF), generated by the external nucleus of the planet; by the Crustal Magnetic Field (CMF), generated by the external layer of the rocks in the planet, and by solar interaction in the ionosphere (Matzner 2001). The total scale intensity of the main magnetic field also known as Total Intensity (F) or Total Field, varies in the terrestrial surface between 22,000 and 60,000 nanoTesla (nT); the magnetic field of the crust varies from tens to

hundreds nT depending on the composition of the rocks in each region; changes in the ionosphere are fast, inconstant and dependent on solar emissions (Butler 2004). The Main magnetic field protects the Earth from the action of the strong solar winds that is factor of an energetic impact over marine environments (Gubbins and Herrero-Bervera 2007).

Seven elements describe the geomagnetic field vector. The northerly intensity (X), the easterly intensity (Y), the vertical intensity (Z) and the derivatives from X, Y, and Z: The horizontal intensity (H), the total intensity or total field (F), the inclination angle (I) and the declination angle (D). The geomagnetic elements are shown below as well as the equations that relate them (Fig. 1).

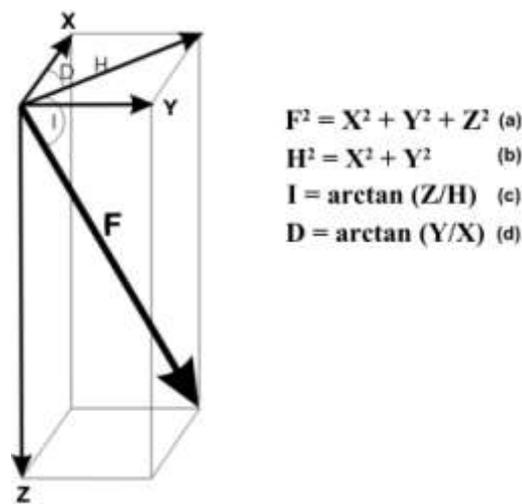


Fig. 1. Components of the Earth's Magnetic Field and its mathematical relationships. The Total Field Intensity (F) represents the module of vector whose direction and sense indicate the field lines of the geomagnetic field.

In the geomagnetic study of vast oceanic regions, global field models are used, which are updated every five years by international agencies (NOAA 2011). Later 2009 updates were introduced in global mathematical models, with information on all components of the geomagnetic field (Butler 2004). The World Magnetic Model (WMM) and the Enhanced Magnetic Model (EMM) were updated incorporating new advances in mathematical computing, enhancing its precision. These models use experimental data obtained through magnetic sensors in satellites, from observatories and geomagnetic stations on land and marine environments. In November 2009 was available the WMM2010 model, elaborated by the National Geophysical Data Center (NGDC) of the National Oceanic and Atmospheric Administration (NOAA) and by the British Geological Survey (BGS) with support from the North Atlantic Treaty Organization (NATO). This model provides the components of the main magnetic field (MMF) for the period of 2000 to 2015 (WMM 2010). In December 2009 was available the EMM2010 model, produced by NGDC in collaboration with the

International Association of Geomagnetism and Aeronomy (IAGA), providing the intensity of the main magnetic field plus that of the terrestrial crust (EMM 2010) to the period of 2000-2015. The WMM2010 and EMM2010 models are useful in the evaluation of the intensity and direction of the geomagnetic field in marine environments.

This work investigates the variability of the magnetic field intensities relative to the oceanic crust and the movements of marine green turtles (*Chelonia mydas*) it left from the Galápagos Archipelago.

Material and Methods

Two geomagnetic models were used to compare the crustal magnetic field and the oceanic movements of green turtles (*Chelonia mydas*), monitored by satellite, to the region of the Galápagos Archipelago (Ecuador). At region investigated by Seminoff *et al.* (2008), seven specimens left from Galápagos in 2005 post-nesting oceanic movements. The geographical positions (latitude and longitude) of each one of the animals were monitored by satellite using the Argos System (2008) is available at http://www.int-res.com/articles/suppl/n004p057_app/. The specimens were designated by Seminoff *et al.* (2008) as CM5, CM6, CM7, CM9, CM10, CM11 and CM12, making oceanic movements. The area covering all turtle's movements are bounded by latitude 12°N to 13°S and longitude 78°W to 103°W, like shown in Fig. 2.

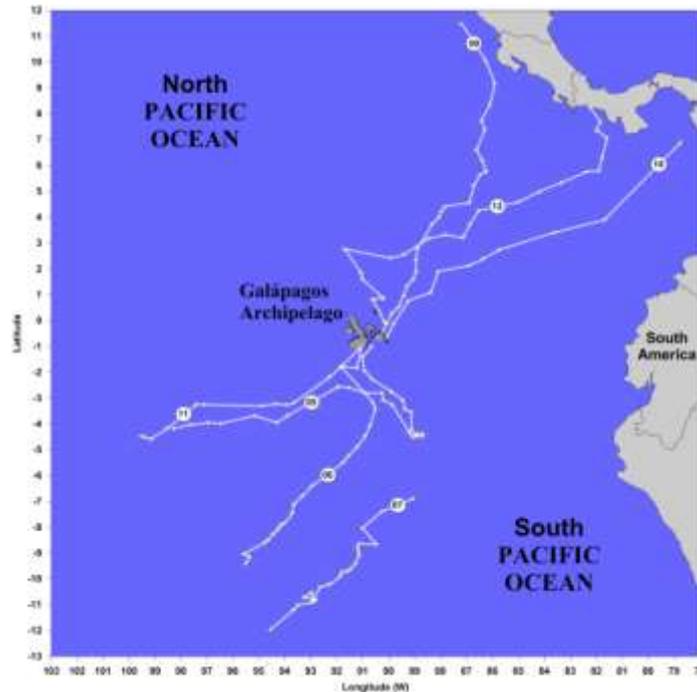


Fig. 2. Movements of seven green turtle specimens (indicated by white circles) that left the Galápagos Islands in 2005 and followed by Seminoff *et al.* (2008). The geographic limits are at Mercator projection.

The intensities of the components X, Y and Z from the Main Magnetic Field were obtained using the WMM2010 model, available at <http://www.ngdc.noaa.gov/geomag/WMM/>. The intensities of the components X, Y and Z from the Enhanced Magnetic Field (Main Field added to the Crust's Magnetic Field) were obtained using the EMM2010 model, available at <http://www.ngdc.noaa.gov/geomag/EMM/>. Both models are ready to use on C++ language software, which provides the intensity of each component within a chosen area. The geographic limits introduced were the same of Fig. 2, at mean sea level altitude, date 2005

and geographic spacing of 0.01 degrees. Thus was obtained a table containing latitude, longitude and the intensity of each component of geomagnetic field. The intensity of X, Y and Z relative to the crust was obtained by subtracting each one of the components of Enhanced Magnetic Field (EMF) from its respective intensity of the Main Field (MF). Following was applied the equation on Fig. 1(a) where X, Y and Z are the numeric difference between EMF and MF component intensities, thus obtaining the intensities of F relative to the oceanic Crust (F_{Crust}).

Using the software Surfer 11 and Voxler 3 (Golden Software Inc. 2012), grids and maps of F_{Crust} were prepared with colored contours distribution. The “minimum curvature” interpolation gridding method was used with this software. Each map built reproduces the intensities of the magnetic fields at mean sea level and in oceanic region correspondent to the movements. Geo-referenced maps were built in 3D format (plain projection and video format). The Crust’s magnetic intensity map was overlapped by turtle’s positions along the movements. An evaluation on behavior of F Crust was done, both at larger scale as at areas closer (0.5 x 0.5 degrees around the each animal positions) of the seven specimens along its oceanic routes. Were investigated how the intensity of F_{Crust} contrasts with the oceanic area around to each point; analyzing its percentage relative changes to maximum, minimum and the local mean.

The relative magnitudes of these intensities (F_{Crust}) are defined below:

(P₁): Percentage between the intensities at the turtle’s position (F_t) and local averages (F_{mean}) - Equation (2).

(P₂): Module relative to variation of P₁ to 100% - Equation (3).

(P₃): Relative percentage of F_t to local maximum (F_{max}) - Equation (4).

(P₄): Relative percentage of F_t to local minimum (F_{min}) – Equation (5)

$$P_1 = 100 \times (F_t / F_{mean}) \quad \text{Equation (2)}$$

$$P_2 = \pm |(100 - P_1)| \quad \text{Equation (3)}$$

$$P_3 = 100 \times ((F_t - F_{max}) / (F_{max} - F_{min})) \quad \text{Equation (4)}$$

$$P_4 = 100 \times ((F_t - F_{min}) / (F_{max} - F_{min})) \quad \text{Equation (5)}$$

Results and Discussion

With the distributions of total magnetic field intensities (F) relative to the region whose bounds are given by Fig. 2 on the same time of the animal movements, were obtained the maps shown in Fig. 3.

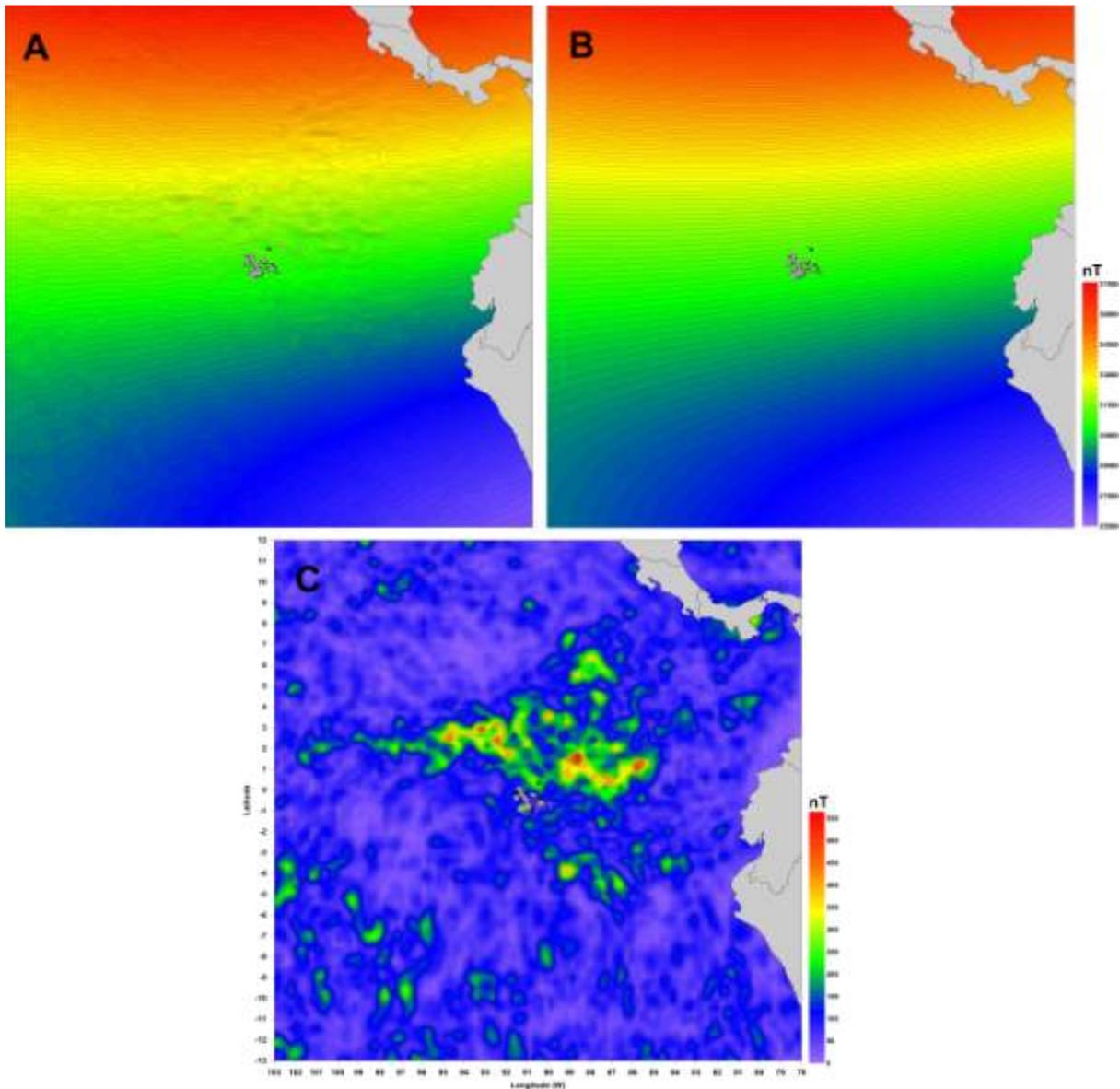


Fig. 3. Maps distribution relative to Enhanced Magnetic Field (A), Main Magnetic Field (B) and Oceanic Magnetic Crust Field (C) around the region of the Galápagos Archipelago investigated. The geographic limits in Mercator projection are the same.

It is clearly seen that the Main Magnetic Field (Fig. 3B) has a continuous distribution in its intensity, while the Enhanced Magnetic Field (Fig. 3A) has light intensity variations due to the action of the magnetic field generated by oceanic crust (Fig. 3C).

It is observed that the distribution map of crustal field (Fig. 3C) has a large number of regions with irregular variations in intensities (magnetic anomalies). The existence of these regional anomalies are expected because the region is close to failures of the tectonic plates Cocos and Nazca as pointed by Meschede and Barckhausen (2000). Were plotted the position points (with their respective latitudes and longitudes) of seven animals (Fig. 2) studied by Seminoff *et al.* (2008), connected by dotted lines and overlapped the crustal magnetic anomalies map (Fig. 3C), yielding the map shown in Fig. 4.

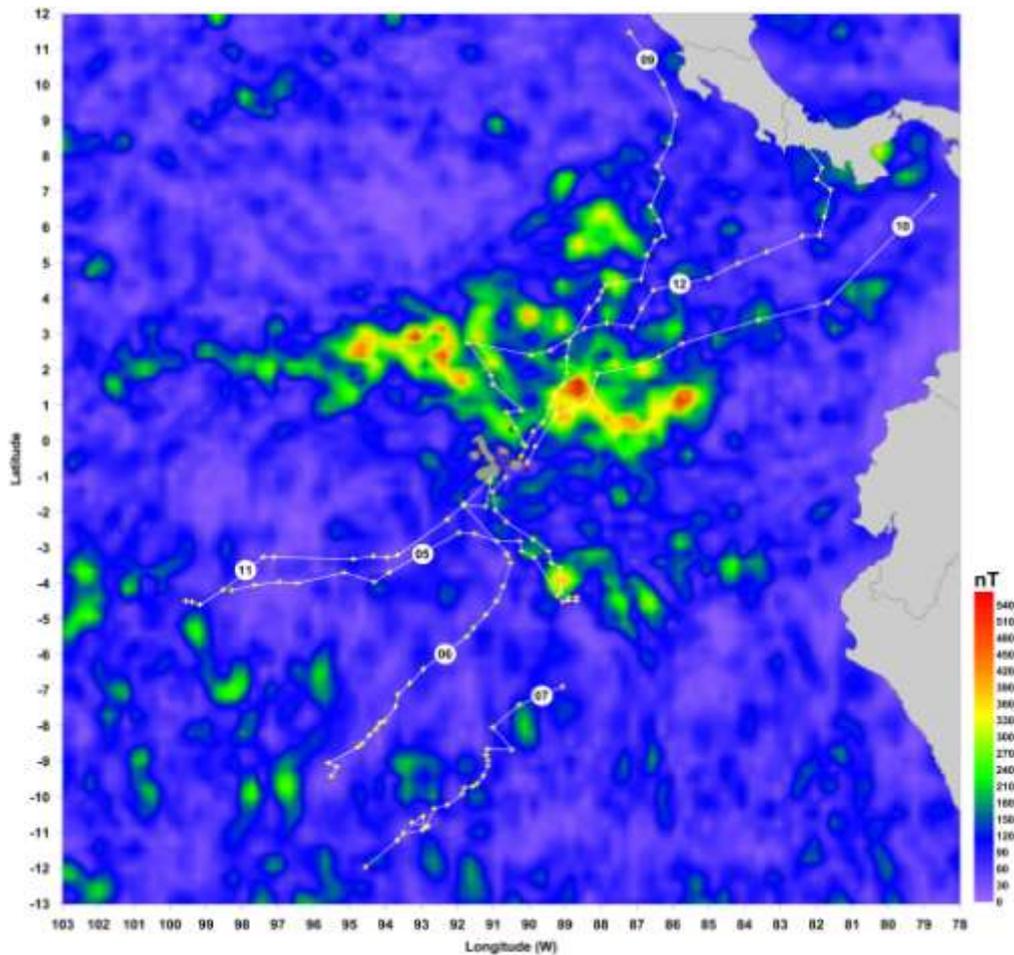


Fig. 4. Displacements of 07 green turtles positions (numbers indicated by white circles and marked by yellow crosses), leaving the Galápagos archipelago, over the magnetic field intensity of crust distribution at the region near around.

Some researchers like Akesson *et al.* (2003), Alerstam (2003), Lohmann *et al.* (2008a) and Lohmann *et al.* (2008b) not identified magnetic anomalies in their respective regions of study because were used components of the Main Magnetic Field (total field, magnetic declination, vertical field and magnetic inclination), not applying the crust's field to evaluate. As already described in specialized literature by Butler (2004), Lanza and Meloni (2006) and Matzner

(2001), the nominal intensity of the Crust Field is smaller than Main Field, but has a greater relative variability.

A spatial distribution of the crustal magnetic field at mean sea level, in a three-dimensional form and plain projection is shown in Fig. 5. Observing this spatial distribution, the crust's field behaves a shape resembling a "geomagnetic surface".

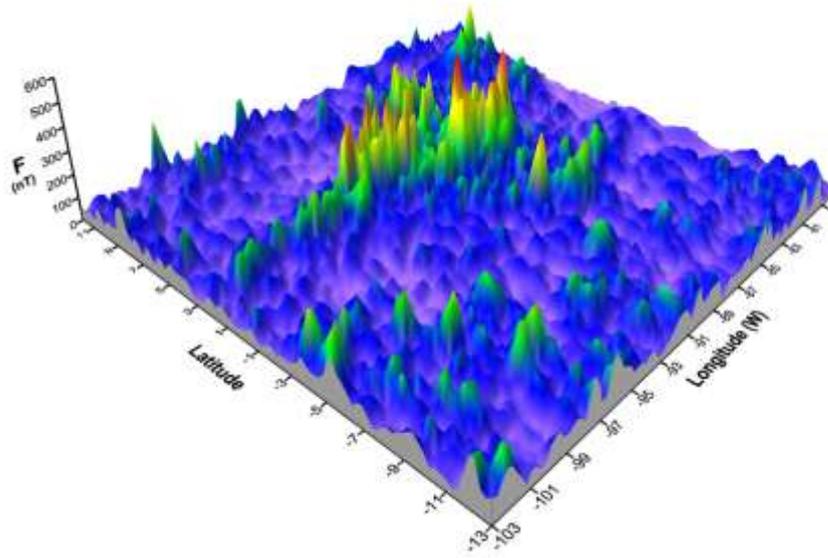


Fig. 5. Three-dimensional projection of geomagnetic anomalies (F) of Crust determined to 2005 and mean sea level, around Galápagos Archipelago (near red colors). The height dimension (F) is enlarged for better viewing.

This "geomagnetic surface" contains a large number of small regions where strong relative variability of the field can be seen. The fact that the turtle's movements are done near these regions, points to the hypothesis that this geophysical parameter can actuate on the sensitivity of these animals to the geomagnetism, even though little is known about these biological mechanisms. There are indicators of the sensibility of marine animal to magnetism reported by Heyers *et al.* (2007) with migratory birds, Wiltschko and Wiltschko (2005) with arthropods, clams and various vertebrates, besides Lohmann (1995) when studying the behavior of lobsters. The main argument contrary to the existence of biological interaction with the crustal field is the fact that this field has intensity much smaller than the main geomagnetic field. But the crustal field to this area, having a relative variability much larger than the main field, could hypothetically cause some type of sensibility in these animals.

Fig. 6 shows a three-dimensional projection of the crustal field with geo-referenced overlapping of animal trails. For a better visualization of this projection, animations in video were done and presented in annex 01 (all specimens), annex 02 (CM5), annex 03 (CM6),

annex 04 (CM7), annex 05 (CM9), annex 06 (CM10), annex 07 (CM11) and annex 08 (CM12). The three-dimensional trajectories of these specimens show us that movements are at vicinity of the regions with greater relative variability of the crustal field. Even though each specimen has a different track from the others, it describe trails whose boundaries are closer to the geomagnetic anomalies.

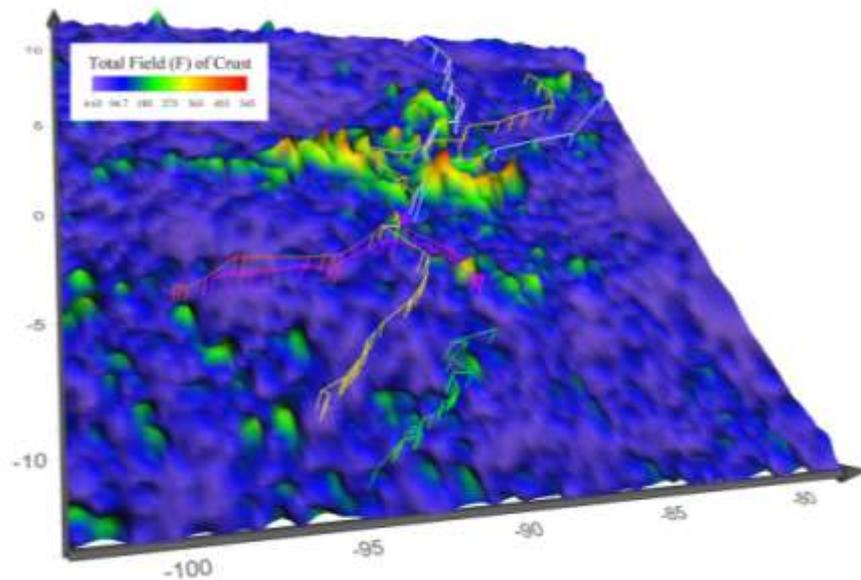


Fig. 6. Comparison between oceanic movements of 07 green turtles and the 3D projection of crustal magnetic field around the Galapagos Islands.

Regions near each position occupied by these 07 specimens (half by half degree around) were investigated. The limit of half degrees around was chosen due to the fact be approximately the separation between most magnetic anomalies. A larger area would include magnetic anomalies outside the region from each point and would not be a local analysis. To illustrate the procedure, one position of each specimen was chosen (randomly) and the distribution of crustal field, for each one of these limits, shown in Fig. 7.

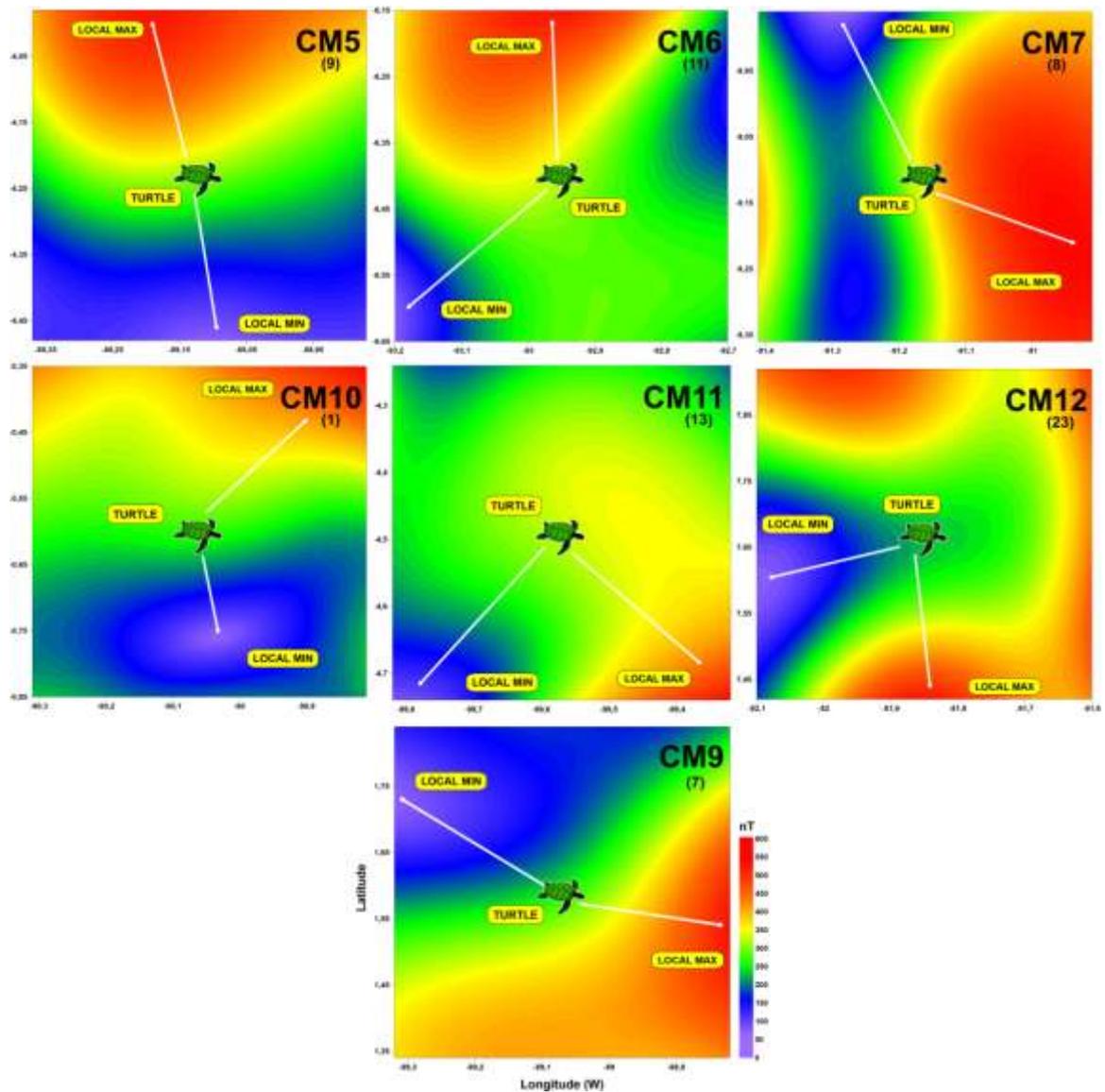


Fig. 7. Crust's field on 0.5 by 0.5 degrees around areas to the turtles. Red color indicates strongest areas, blue weak and green intermediate. Bracket numbers show the identification of the position in the path from the beginning of the ocean crossing. The lines in white color indicate the direction of local maximum and minimum.

Everything seems to indicate that these animals, even across regions with different intensities of crustal F, seek to remain in positions closer to the mean's relative intensity. Representing the intensities of all turtle's points along each trajectory in graphical form, the Fig. 8 was constructed.

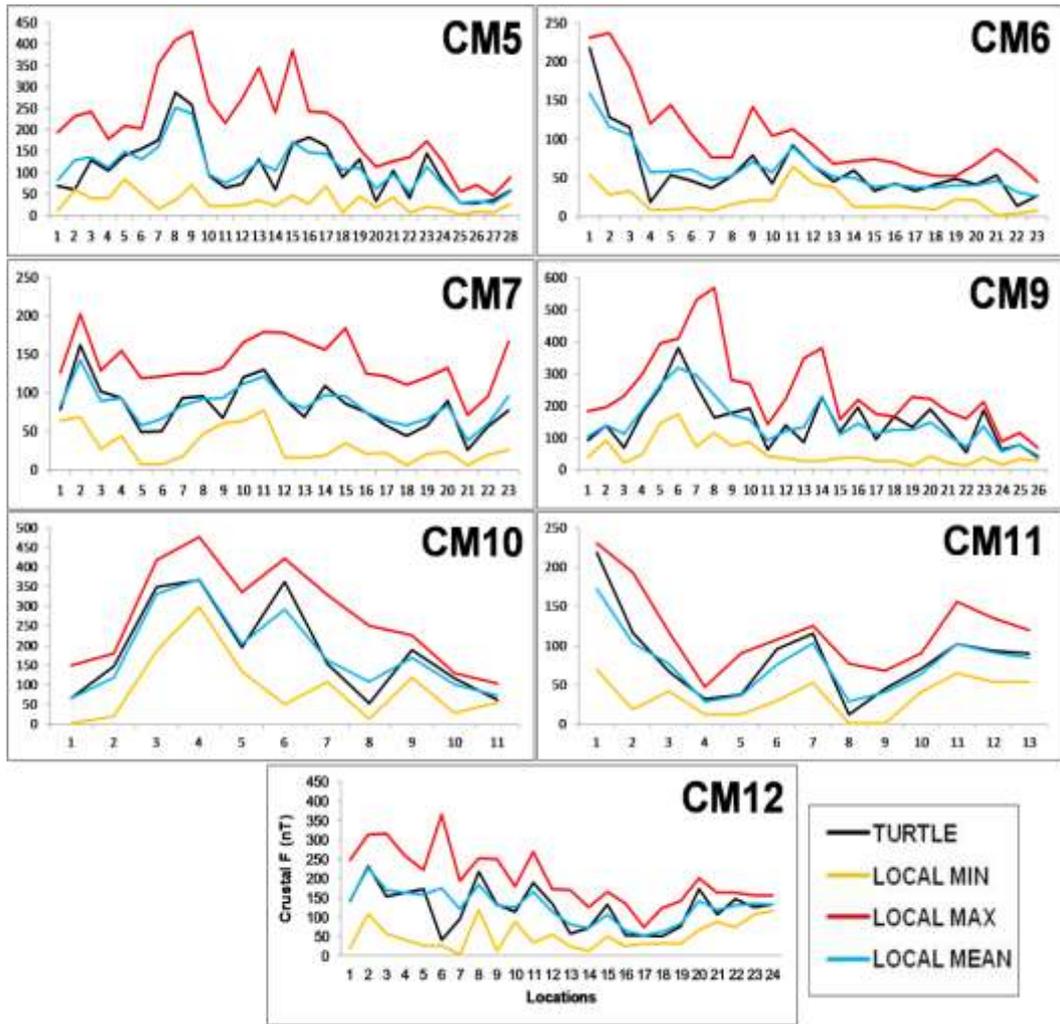


Fig. 8. Graphs representing the crustal magnetic field variation over all points on trajectories of the animals and at half by half degrees around area. Intensities concerning to the animals (TURTLE) is represented by black lines, to local maxima by red (LOCAL MAX), minimum by orange (LOCAL MIN) and the respective local means by blue (LOCAL MEAN).

Note that the mean's intensities of surrounding areas are too close to the intensity which the animals are subjected. Thus it appears that the animals are, ordinarily, at positions very close (numerically) to the local mean intensities. The black lines, indicating the intensities at each animal position, are close to the blue lines which indicate the mean local intensities. To quantify this perspective were determined the percentage variation between these local intensities and values at points that animals were. Table 1 show these variations: the number of positions on oceanic turtle's track (n), the relative percentages between turtle and local mean intensities, the relative percentages between turtle and the local maximum-minimum.

Table1. Percentage values on crust's magnetic field at surrounding areas (0.5 by 0.5 degrees) relative to the turtle's positions as seen at equations 2-5. Averages to (n) positions of all specimens, at turtle's positions (F_t), local mean (F_{mean}), relative percentage on F_t-F_{mean} (P_1), module difference percentage variation F_t-F_{mean} (P_2), relative percentage to local maximum (P_3), relative percentage to local minimum (P_4). The units of F_t and F_{mean} are nT and others %.

Specimen	n	F_t (nT)	F_{mean} (nT)	P_1 (%)	P_2 (%)	P_3 (%)	P_4 (%)
CM5	28	110,7	110,8	97,4	$\pm 2,6$	54,6	45,4
CM6	23	62,4	59,3	105,2	$\pm 5,2$	48,2	51,8
CM7	23	81,5	83,8	97,3	$\pm 2,7$	54,1	45,9
CM9	26	147,4	145,3	101,4	$\pm 1,4$	47,3	52,7
CM10	11	186,8	180,6	103,4	$\pm 3,4$	50,1	49,9
CM11	13	83,8	77,2	108,5	$\pm 8,5$	44,3	55,7
CM12	24	123,4	127,2	97,0	$\pm 3,0$	51,2	48,8

We observe that the percentage values between the position where the animals passed and the local means range from 97.0% (CM12) to 108.5% (CM11). The average of all values for all animals and at all positions is 101.5%, which shows a very large proximity between them. On the other hand, the percentage differences relating to the maxima and minima are close to 50%. Which tells us that these animals are navigating (on average) between relative intensities intermediate between local maxima and minima of magnetic field of crust.

Many researchers have investigated the hypothesis of geomagnetic field interference on the oceanic migration on animals. However many researches only relates the main magnetic field that, even though more intense than the crustal magnetic field, not report significant anomalies (with the exception of the North and South Poles) whereas the crustal presents a great quantity of these anomalies and has a great relative variability. It is hard to affirm with certainty about the direct dependence on the navigation of these animals to these magnetic anomalies; it is more likely that this specimens does not only uses this variable, but also an ensemble of sensory variables such as sunlight, winds, among others, acting as support to the orientation in open sea, as argued by Lohmann *et al.* (2008a). It is possible to indicate several plausible hypotheses, in the attempt to elucidate the navigability with support of the geomagnetic field. Among these hypotheses we can mention the possible existence of internal organic structures that could be capable of registering the relative and not absolute intensity of the crustal magnetic field. Another plausible hypothesis would be the fact that magnetic intensity is linked to gravitational anomalies coming from the composition of the rocks in the oceanic crust and that could alter environmental conditioners, such as the chemical and biological composition on the waters navigated by these animals. It is highly recommended that in future works of accompanying these animals by telemetry, direct measurements of the

crustal magnetic field be done, in parallel to the usual oceanographic parameters. Only a more ample exploration, involving studies in specific biology analysis of this species, evaluations of respective environmental conditioners and the intensity of the geomagnetic field relative to other marine regions, will answer these questions with greater depth and will turn this hypothesis conclusive.

References

- Åkesson, S.; Broderick, A.C.; Glen, F.; Godley, B.J.; Lush, P.; Papi, F. and Hays, G.C. (2003). **Navigation by green turtles: which strategy do displaced adults use to find Ascension Island?** *Oikos* 103. 363-372.
- Alerstam, T. (2003). **Animal Behavior: The lobster navigators.** *Nature* 421. 27-28.
- Argos System. (2008). **Argos User's Manual: Worldwide tracking and environmental monitoring by satellite.** CLS. Available at <http://www.argos-system.org/web/en/76-user-s-manual.php>. Accessed 10 May 2012.
- Broderick, C.A.; Coyne, M.S.; Fuller, W.J. Glen, F.; Godley, B.J. (2007). **Fidelity and overwintering of sea turtles.** *Proc. R. Soc. B*, 274, 1533-1539.
- Butler, R.F. (2004). **Paleomagnetism: Magnetic Domains to Geologic Terranes.** Electronic Edition. Department of Chemistry and Physics. 238p. University of Portland. Portland. Oregon. USA.
- Cheng, I.J. (2000). **Post-nesting migrations of green turtles (*Chelonia mydas*) at Wan-An Island. Penghu Archipelago.** *Taiwan. Mar. Biol.* 137. 747-754.
- EMM (2010). **Enhanced Magnetic Model.** National Oceanic and Atmospheric Administration (NOAA) and National Geophysical data Center (NGDC). National Geophysical Data Center. EGC/2. 325 Broadway. Boulder. CO 80303. USA. Ready to use at <http://www.ngdc.noaa.gov/geomag/EMM/emm.shtml>. Accessed 10 Apr 2012.
- Girard, C.; Sudre, J.; Benhamou, S.; Roos, D.; Luschi, P. (2006). **Homing in green turtles *Chelonia mydas*: oceanic currents act as a constraint rather than as an information source.** *Mar. Ecol. Prog. Ser.* 322. 281-289.
- Golden Software Inc. (2011). **Surfer 10 and Voxler 2 User's Manual.** Golden Software. Inc. 809 14th Street. CO. 80401-1866 USA. Available at www.goldensoftware.com. Accessed 10 May 2012.
- Gubbins, D. and Herrero-Bervera, E. (2007). **Encyclopedia of Geomagnetism and Paleomagnetism.** 1080p. Ed. Springer-Verlag. New York. USA.
- Hays, C.G.; Åkesson, S.; Broderick, A.C.; Glen, F.; Godley, B.J.; Papi, F.; Luschi, P. (2003). **Island-finding ability of marine turtles.** *Proc. R. Soc. Lond. B.* 270. Suppl 1. S5-S7.
- Heyers, D.; Manns, M.; Luksch, H.; Gunturku, O.; Mouritsen, H. (2007). **A Visual Pathway Links Brain Structures Active during Magnetic Compass Orientation in Migratory Birds.** *PLoS ONE* 2(9): e937. doi:10.1371/journal.pone.0000937.
- Johnsen, S. and Lohmann, K.J. (2008). **Magnetoreception in Animals.** *Physics Today.* 61 (3). 29-35.

Lanza, R. and Meloni, A. (2006). **The Earth's Magnetism: An Introduction for Geologists**. Springer-Verlag. Berlin-Heidelberg. 287p.

Lohmann, K.J.; Pentcheff, N.D.; Nevitt, G.A.; Stetten, G.D.; Zimmer-Faust, R.K.; Jarrard, H.E.; Boles, L.C. (1995). **Magnetic orientation of spiny lobsters in the ocean: experiments with undersea coil systems**. JEB, 198. 2041–2048.

Lohmann, K.J. (2007). **Sea Turtles: Navigating with Magnetism**. Current Biology 17. N. 3. R104.

Lohmann, K.J.; Lohmann, C.M.F.; Endres, C.S. (2008a). **The sensory ecology of ocean navigation**. The Journal of Experimental Biology 211. 1719-1728.

Lohmann, K.J.; Luschi, P.; Hays, G.C. (2008b). **Goal navigation and island-finding in sea turtles**. JEMBE, 356, 83-95.

Luschi, P.; Hays, G.C.; Del Seppia, C.; Marsh, R. and Papi, F. (1998). **The navigational feats of green sea turtles migrating from Ascension Island investigated by satellite telemetry**. Proceedings of The Royal Society Biology 265. 2279-2284.

Luschi, P.; Åkesson, S.; Broderick, A.C.; Glen, F.; Godley, B.J.; Papi, F.; Hays, G.C. (2001). **Testing the navigational abilities of ocean migrants: displacement experiments on green sea turtles (*Chelonia mydas*)**. Behav. Ecol. Sociobiol. 50. 528-534.

Lutz, P.L.; Musick, J.A.; Wyneken, J. (2003). **The Biology of Sea Turtles - Vol II**. CRC Press. Marine Science Series. 472p. New York. USA.

Matzner, R.A. (2001). **Dictionary of Geophysics, Astrophysics and Astronomy**. Ed. CRC Press. 526p. USA.

Meschede, M. and Barckhausen, U. (2000). **Plate Tectonic Evolution of the COCOS-NAZCA Spreading Center**. Proceedings of the Ocean Drilling Program. Scientific Results Volume 170.

NOAA. (2011). National Oceanic and Atmospheric Administration. National Geophysical Data Center. **The Geomagnetic models**. at <http://www.ngdc.noaa.gov/geomag/geomag.shtml>. Accessed 10 Dec 2012.

Papi, F.; Liew, H.C.; Luschi, P. and Chan, E.H. (1995). **Long-range migratory travel of a green turtle tracked by satellite: evidence for navigational ability in the open sea**. Mar. Biol. 122. 171-175.

Papi, F.; Luschi, P.; Åkesson, S.; Capogrossi, S. and Hays, G.C. (2000). **Open-sea migration of magnetically disturbed sea turtles**. J. Exp. Biol. 203. 3435–3443.

Phillips, J.B.; Deutschlander, M.E.; Freake, M.J. and Borland, S.C. (2001) **The role of extraocular photoreceptors in newt magnetic compass orientation: parallels between light-dependent magnetoreception and polarized light detection in vertebrates**. J. Exp. Biol. 204. 2543-2552.

Plotkin, P. (2003). **Adult Migrations and Habitat Use**. In *The Biology of Sea Turtles*. Vol. II. (ed. Lutz, P.L. and Musick, J.A.). Cap. 8. p.231. Ed. CRC Press. USA.

Seminoff, J.A.; Zárata, P.; Coyne, M.; Foley, D.G.; Parker, D.; Lyon, B.N.; Dutton, P.H. (2008). **Post-nesting migrations of Galápagos green turtles (*Chelonia mydas*) in relation to oceanographic conditions: integrating satellite telemetry with remotely sensed ocean data**. *Endang. Species Res.* 4. 57-72.

Walker, M.M.; Diebel, C.E.; Haugh, C.V.; Pankhurst, P.M.; Montgomery, J.C. and Green, C.R. (1997). **Structure and function of the vertebrate magnetic sense**. *Nature* 390. 371-376.

Willis, J.; Phillips, J.; Muheim, R.; Rasilla, F.J.D. and Hobday, A.J. (2009). **Spike dives of juvenile southern bluefin tuna (*Thunnus maccoyii*): a navigational role?** *Behavioural Ecology and Sociobiology* 64. 57-68.

Wiltschko, W. and Wiltschko, R. (2005). **Magnetic orientation and magnetoreception in birds and other animals**. *J. Comp. Physiol A* 191: 675-693. doi10.1007/s00359-005-0627-7.

Witt, M.J.; Akesson, S.; Broderick, A.C.; Coyne, M.S.; Ellick, J.; Formia, A.; Hays, G.C.; Luschi, P.; Stroud, S.; Godley, B.J. (2010). **Assessing accuracy and utility of satellite-tracking data using Argos-linked Fastloc-GPS**. *Animal Behaviour* 80. 571-581.

WMM2010. (2010). **The US/UK World Magnetic Model for 2010/2015**. British Geological Survey. Technical Report. Macmillan S. Quinn J M. Ready to use at <http://www.ngdc.noaa.gov/geomag/WMM/>. Accessed 10 May 2012.

CAPÍTULO 7

**O campo magnético da crosta terrestre e seu relacionamento com
movimentos oceânicos de tartarugas-de-couro (*Dermochelys coriacea*)
no Oceano Atlântico Sul**

Guilherme P. da Silva e Tereza C. M. de Araújo

**Laboratório de Oceanografia Geológica (LABOGEO), Departamento de Oceanografia,
Centro de Tecnologia e Geociências, Universidade Federal de Pernambuco (UFPE),
Cidade Universitária, 50670-901, Recife - PE, Brazil.**

Artigo a ser enviado ao periódico

Journal of Experimental Marine Biology and Ecology (JEMBE)

www.elsevier.com/locate/jembe

O campo magnético da crosta terrestre e seu relacionamento com movimentos oceânicos de tartarugas-de-couro (*Dermochelys coriacea*) no Oceano Atlântico Sul

Guilherme P. da Silva e Tereza C. M. de Araújo

Laboratório de Oceanografia Geológica (LABOGEO), Departamento de Oceanografia, Centro de Tecnologia e Geociências, Universidade Federal de Pernambuco (UFPE), Cidade Universitária, 50670-901. Recife - PE, Brasil.

Resumo

Neste trabalho analisa-se a relação entre movimentos migratórios de dois espécimes de tartarugas-de-couro (*Dermochelys coriacea*), no Oceano Atlântico Sul, e o comportamento do campo magnético da crosta terrestre nessa região. Foram utilizados os modelos geomagnéticos globais WMM2010 e EMM2010 na determinação da intensidade de campo total (F), para o nível do mar, além de mapas contendo percursos georreferenciados destes animais. Foram encontradas anomalias magnéticas de campo crustal que, sobrepostas por trilhas destes espécimes, mostram um relacionamento comum à maioria das posições. Verificou-se que os espécimes analisados, navegam dentro de intensidades médias locais de campo para uma área de entorno, de meio por meio grau. Gráficos e tabelas mostram que a navegação destes espécimes ocorre ao longo de regiões com menor variabilidade geomagnética. As diferenças entre intensidades nos pontos ocupados pelos animais e as médias locais não ultrapassam 2%. Assim, existem indícios de que estes animais utilizem-se de zonas de conforto geomagnético destas anomalias, como parâmetros de orientação da sua navegação oceânica.

Palavras Chaves: Tartarugas-de-couro. Brasil. Geomagnetismo. Anomalias magnéticas.

Abstract

In this work were analyzed the relationship between the migratory movements of two specimens of leatherback turtles (*Dermochelys coriacea*) in the South Atlantic Ocean and the behavior of the magnetic field of the Earth's crust to the region. The global geomagnetic models WMM2010 EMM2010 were used to determining the intensity of the total field at sea level, pathways georeferenced maps containing these animals too. Were found crustal magnetic anomalies field that overlapped the trails these specimens show an approximation of the relative geographic positions occupied by animals. It was found that the specimens analyzed navigate within the local average intensity of the field in an area of around half by half a degree. Graphs and tables show that shipping these specimens occurs over regions with lower geomagnetic variability. The differences between intensities at points occupied by the animals and the local media did not exceed 2%. Thus, there are strong indications that these animals use these anomalies as orientation parameters of its oceanic navigation and guidance.

Key Words: Turtles leatherback. Brazil. Geomagnetism. Magnetic anomalies.

Introdução

A tartaruga-de-couro (*Dermochelys coriacea*), também chamada tartaruga-gigante, tartaruga-de-cerro ou tartaruga-de-quilha, é a única espécie da família *Dermochelyidae*, sendo a maior das espécies de tartarugas marinhas (Lutz e Musick, 1997). Possui tamanho entre 1,5 e 2,0 metros de comprimento e 700 Kg em média, podendo atingir 3 m e 900 Kg (Den Hartog, 1980). É uma espécie cosmopolita, podendo ser encontrada tanto em regiões oceânicas tropicais, como temperadas, e até polares. Os machos quase nunca aproximam-se da costa, enquanto que as fêmeas fazem seus ninhos em praias arenosas. Os espécimes jovens vivem em regiões de águas quentes (com temperaturas acima de 26⁰C), até ultrapassarem 100 cm de curvatura na carapaça (James *et al.*, 2005; James *et al.*, 2006).

Seu comportamento de mergulho varia muito, devido às distribuições irregulares de sua fonte de alimento, o que obriga a espécie a percorrer grandes distâncias para manter uma alimentação suficiente. Podem mergulhar até a 1.000 m de profundidade, porém os limites de mergulho estão quase sempre próximos a 200 metros. Apresentam grande tolerância térmica, reproduzindo-se entre os meses de setembro e janeiro. As fêmeas retornam para desovar, a cada dois ou três anos, em média, realizando de cinco a sete desovas em cada temporada reprodutiva (Sale e Lush, 2009). Em cada desova, são depositados entre 70 e 90 ovos. A incubação dura cerca de 60 dias, e o sexo das ninhadas é influenciado pela temperatura de incubação dos ovos (Machado *et al.*, 2008). Estas tartarugas vêm sendo estudadas, durante seus movimentos migratórios, com o uso de telemetria via satélite (Eckert *et al.*, 1989; Southwood *et al.*, 1999; Eckert, 2002).

Estudos de oceanografia biológica têm indicado haver uma capacidade de percepção magnética em variadas espécies marinhas, tais como tartarugas (Luschi *et al.*, 2001; Lohmann *et al.*, 2008), peixes pelágicos (Willis *et al.*, 2009) e crustáceos (Alerstam, 2003). Dentre estes animais, as tartarugas destacam-se como um dos mais emblemáticos (Seminoff *et al.*, 2008). Se as tartarugas marinhas são capazes de utilizar o magnetismo do planeta como meio de navegação oceânica, ainda é um mistério biológico, bem como não são conhecidos os fatores que dão início e fim aos movimentos migratórios. Porém, sabe-se que estas migrações são fortemente influenciadas por condições ambientais oceânicas físicas, químicas e biológicas (Ferraroli *et al.*, 2004; Hays *et al.*, 2006; Luschi *et al.*, 2006). Estes animais são monitorados por telemetria, existindo alguns parâmetros que, possivelmente, influenciam na navegação oceânica, tais como a temperatura da superfície marinha, a velocidade das correntes

oceânicas, a salinidade da água, as áreas de alimentação, a conexão com predadores, dentre outros (Silva e Araújo, 2011).

O modelo geofísico atual (Matzner, 2001) mostra que o planeta Terra possui um campo magnético principal (*Main Field*), gerado pelo núcleo externo da Terra, de intensidade variando entre 22.000 e 60.000 nanoTeslas (nT). Outra contribuição é dada pelo campo da crosta terrestre, que é bastante variável, devido aos movimentos e às estruturas geológicas próximas à superfície, com intensidade variando entre dezenas a centenas de nT (Gubbins e Herrerobervera, 2007).

O presente estudo investiga a variabilidade do campo magnético da crosta terrestre, em regiões próximas às rotas de movimentos oceânicos de tartaruga-de-couro que ocorrem no Oceano Atlântico Sul, relacionando esta grandesa geofísica às posições ocupadas por estes animais. Posições geográficas oceânicas em movimentos de larga escala, relativas a dois espécimes, registradas por Lopez-Mendilaharsu *et al.* (2009), são comparadas à intensidade do campo magnético gerado pela crosta e uma avaliação de intensidades locais deste campo, realizada.

Material e Métodos

Dois modelos matemáticos de âmbito global foram utilizados, na determinação do campo geomagnético, além de mapas contendo posições geográficas de tartarugas-de-couro publicados por Lopez-Mendilaharsu *et al.* (2009) e monitorados por telemetria via satélite, que migravam na região oceânica a Sudeste da América do Sul (Fig. 1). As posições geográficas dos animais foram obtidas a partir de mapas, sendo coletadas 52 posições (latitude e longitude) referentes ao espécime chamado pelos autores por T1 e 47 posições do espécime T2, conforme mostra a Fig. 1. Suas rotas foram registradas em projeção Mercator, no período de 2005 a 2007, tendo o espécime T1 (fêmea) percorrido cerca de 8900 km, e o T2 (macho) 6700 km. A localização dos animais foi coletada por projeção digital, em mapa georreferenciado, com o uso do software SURFER11 (Golden Software, 2012).

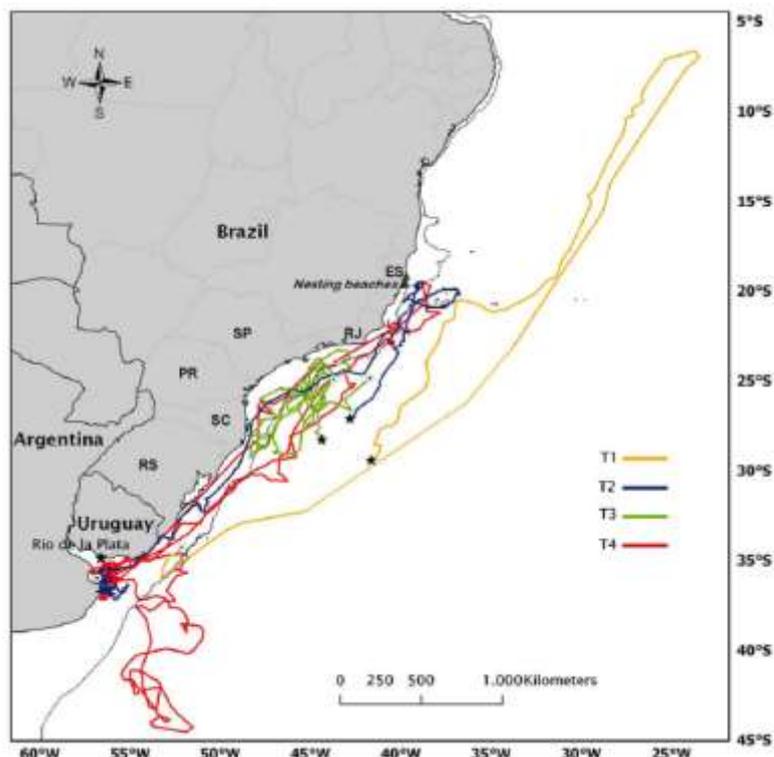
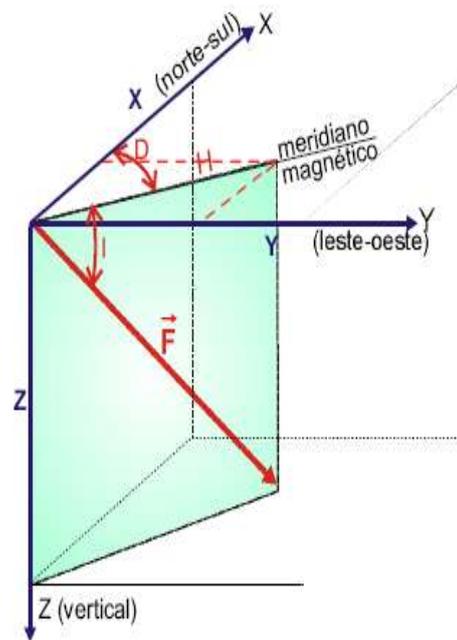


Fig. 1. Área de estudo. Movimentos oceânicos de tartarugas-de-couro, descritos por Lopez-Mendilaharsu *et al.* (2009). Foram determinadas as coordenadas dos espécimes T1 (uma fêmea indicada por linhas na cor laranja) e T2 (um macho indicado por cor azul).

Para a determinação da intensidade do campo magnético gerado pela crosta, foram utilizados os modelos mundiais atualizados (válidos para o período 2000-2015) WMM2010 e o EMM2010, ambos fornecidos pela NOAA-NGDC (National Oceanic and Atmospheric

Agency – National Geophysics Data Center - USA) e o BGS (British Geological Survey – UK).

As componentes do campo geomagnético (Fig. 2) foram determinadas em escala de décimos de nT. Para o campo magnético principal terrestre (*Main Field*), foi utilizado o modelo WMM2010 (WMM, 2010), e para a intensidade do campo magnético ampliado (campo principal adicionado ao campo gerado pela crosta) utilizou-se o modelo EMM2010 (EMM, 2010). Tabelas contendo 160.000 pontos de identificação geográfica foram construídas, contendo latitude, longitude e intensidade das componentes destes campos. Softwares específicos foram utilizados para cada modelo (WMM2010_grid.c para o campo principal e EMM2010_grid.c para o campo ampliado, ambos em linguagem computacional C++), disponíveis para pesquisadores em <http://www.ngdc.noaa.gov/geomag/WMM/> e <http://www.ngdc.noaa.gov/geomag/EMM/>, respectivamente. A intensidade total (F) do campo magnético gerado pela crosta oceânica foi obtida pela subtração entre as componentes X, Y e Z, do campo ampliado, e as componentes X, Y e Z, do campo principal (Fig. 2). A seguir foi aplicada a Equação 1 (Fig. 2), na determinação da intensidade de F referente à contribuição da crosta terrestre, para cada posição geográfica da região representada na Fig. 1. Os limites geográficos são os mesmos da área analisada: latitudes de 5°S a 45°S e longitudes de 22°W a 60°W, e grau de passo mínimo entre eles de 0,1°.



Equação (1)

$$F^2 = X^2 + Y^2 + Z^2$$

Fig. 2. Representação das componentes do campo geomagnético. O vetor F representa o campo total, derivado das componentes Norte-Sul (X), Leste-Oeste (Y) e Vertical (Z), todas na unidade nanoTesla (nT). A equação (1) mostra como obter-se a intensidade de F, a partir das demais componentes do campo. Fonte: Miranda (2004).

Com o uso do software Surfer11 (Golden Software, 2012), grades de intensidade do campo magnético da crosta foram preparadas com resolução de décimos de grau, e construídos os respectivos mapas, com distribuição por contornos coloridos. Utilizou-se o método de interpolação de dados “Kriging”, com linhas de contorno equipotenciais. Cada mapa construído reproduz as intensidades do campo magnético crustal da região oceânica avaliada. As intensidades correspondem ao período inicial de tempo da movimentação dos animais, representando áreas com maiores e menores intensidades da componente magnética de campo total (F).

A seguir, foram sobrepostas ao mapa de intensidade magnética (F) da crosta oceânica. Gráficos e tabelas foram construídos, representando variações de intensidade do campo nas regiões do entorno de cada ponto da movimentação de cada animal (área de $0,5^\circ \times 0,5^\circ$ ao redor de cada ponto dos trajetos dos animais). Para estas regiões do entorno, foi determinado o percentual relativo da intensidade de F relativo à crosta oceânica (F_{Crosta}), sobre os pontos nos quais se posicionaram os animais, as médias de intensidades locais, além dos respectivos máximos e mínimos.

As variações relativas às intensidades F_{Crosta} são definidas abaixo:

(P₁): Percentual entre a intensidade de F_{Crosta} na posição da tartaruga (F_t) e a média local ($F_{\text{média}}$) - Equação (2).

(P₂): Módulo da variação relativa de P₁ e 100% - Equação (3).

(P₃): Percentual relativo entre F_t e o máximo local (F_{max}) - Equação (4).

(P₄): Percentual relativo entre F_t e o mínimo local (F_{min}) - Equação (5).

$$P_1 = 100 \times (F_t / F_{\text{média}}) \quad \text{Equação (2)}$$

$$P_2 = \pm |(100 - P_1)| \quad \text{Equação (3)}$$

$$P_3 = 100 \times ((F_t - F_{\text{max}}) / (F_{\text{max}} - F_{\text{min}})) \quad \text{Equação (4)}$$

$$P_4 = 100 \times ((F_t - F_{\text{min}}) / (F_{\text{max}} - F_{\text{min}})) \quad \text{Equação (5)}$$

Em seguida, foi realizada uma análise visual e matemática dos resultados obtidos. Considerou-se, nesta análise, não só o movimento como um todo, mas também as regiões localizadas do entorno aos pontos do trajeto. Assim, foi discutida um possível relacionamento entre estas intensidades locais e como os animais se comportaram nas suas proximidades.

Resultados e Discussão

A Figura 3 representa a distribuição de intensidade do campo total (F), comparado ao movimento georreferenciado dos espécimes T1 (linhas pontilhadas pretas) e T2 (linhas pontilhadas brancas), descritos por Lopez-Mendilaharsu *et al.* (2009), desde o ponto de soltura dos animais até o último contato.

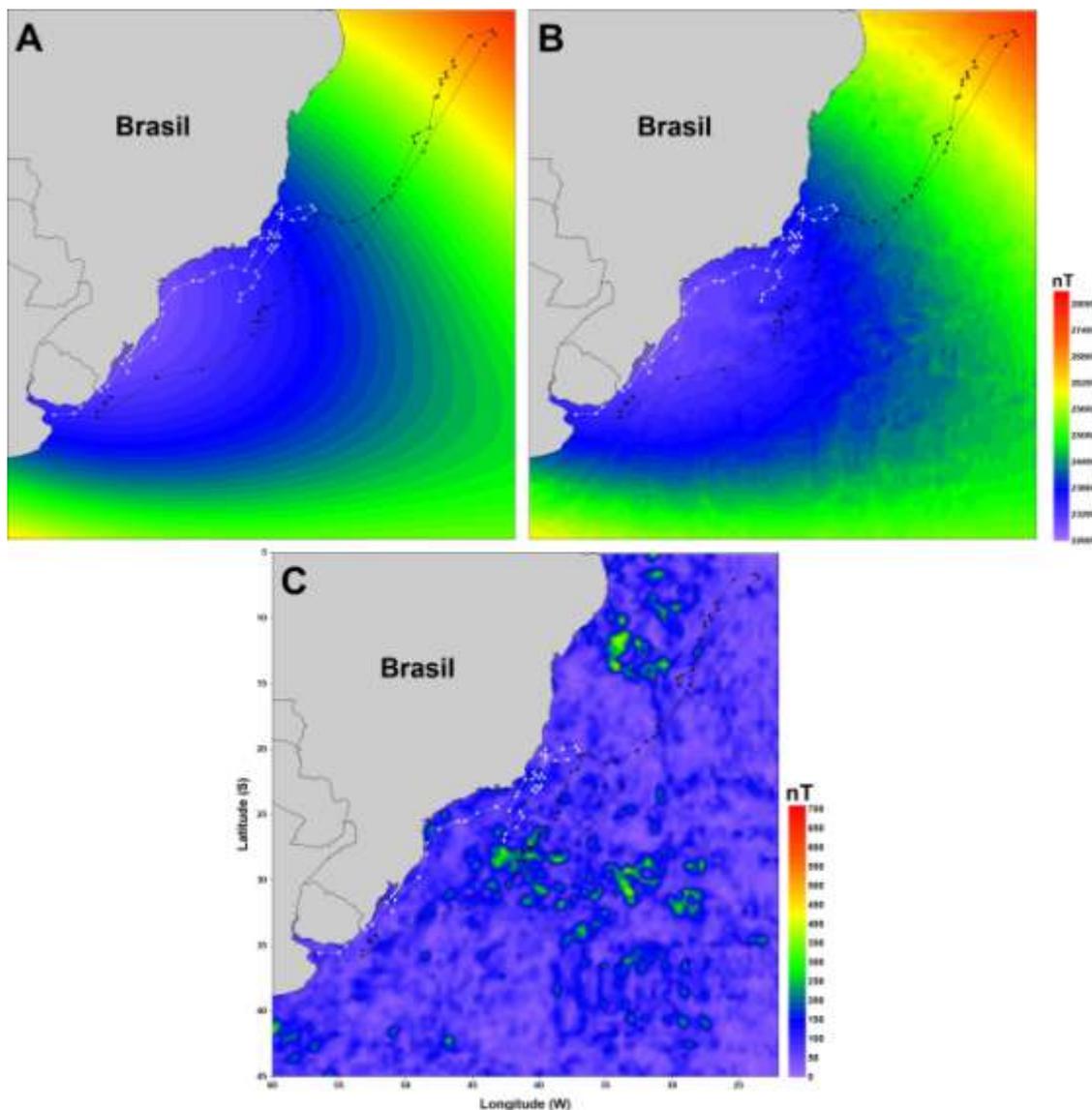


Fig. 3. Distribuição da intensidade de campo magnético total (F) relativa ao campo principal (A), campo ampliado (B) e crosta oceânica (C) da região de estudo, comparada à movimentação dos espécimes T1 (pontos e linhas pretas) e T2 (pontos e linhas brancas). O mapa foi construído em projeção Mercator.

Conforme observa-se na Figura 3A, a intensidade do campo principal porta-se de forma contínua ao redor de uma região anômala, ao Sul do Brasil, conhecida como “Anomalia Magnética do Atlântico Sul” (AMAS). As variações do campo principal são contínuas e

lentas no tempo, embora de intensidade absoluta maior que a crustal. Na Figura 3B, observa-se nuances de variação na intensidade de F, devido às contribuições (ora positivas, ora negativas), do campo da crosta sobre o campo principal; porém ainda prevalece a configuração do campo principal como predominante. Na Figura 3C, observa-se a presença de inúmeras regiões com variações irregulares de campo (anomalias). Estas variações são relativas, devido ao fato do campo crustal variar na escala de centenas de nT, enquanto o campo principal varia na escala de milhares de nT. Para esta região, o campo principal (F) varia de 22.723,2 a 28.069,8 nT (variação percentual relativa de 23,5% entre máximo e mínimo), já o campo ampliado varia de 22.628,9 a 28.030,6 nT (variação percentual relativa de 23,9% entre máximo e mínimo). O campo crustal varia de 0,9 a 714,7 nT (variação percentual relativa de 79.311% entre máximo e mínimo). Assim, o campo crustal, mesmo tendo menor intensidade absoluta, possui um percentual relativo muito maior que o campo principal ou ampliado. No presente trabalho, parte-se da premissa de que estas variações, embora em intensidade absoluta menor e relativa maior, são componentes da orientação de animais marinhos, ao contrário de outros trabalhos de investigação da biologia marinha, que os tem relacionado ao campo principal e não ao crustal (Luschi *et al.*, 2001; Lohman *et al.*, 2008).

Devido a grande extensão a região foi dividida em partes para facilitar a visualização. Nestas partes menores foram feitas as distribuições do campo crustal e, a seguir, projetadas as respectivas trajetórias georreferenciadas. Para o espécime T1, dividiu-se a área total em quatro áreas, e para o espécime T2, em três.

A Figura 4 representa a primeira parte do trajeto do espécime T1 (T1-A), localizada entre as latitudes 23°S e 30°S. Nela, observa-se uma modificação do direcionamento ao longo do trajeto sequencial, ocupando posições no entorno de regiões com variações não-regulares (anomalias) do campo crustal. Uniu-se as sucessivas posições por linhas tracejadas. Nesta observação ampliada, verifica-se que o animal ocupa posições sequenciais sempre próximas às anomalias, indicando uma tendência a evitar regiões com intensidades mais variáveis (tanto mais fortes, indicadas em vermelho, quanto mais fracas, indicadas em azul). As modificações sucessivas de posição, parecem mostrar que os animais buscam uma posição de intensidades localmente confortáveis, ou seja, pontos de intensidade média entre máximos e mínimos do campo local.

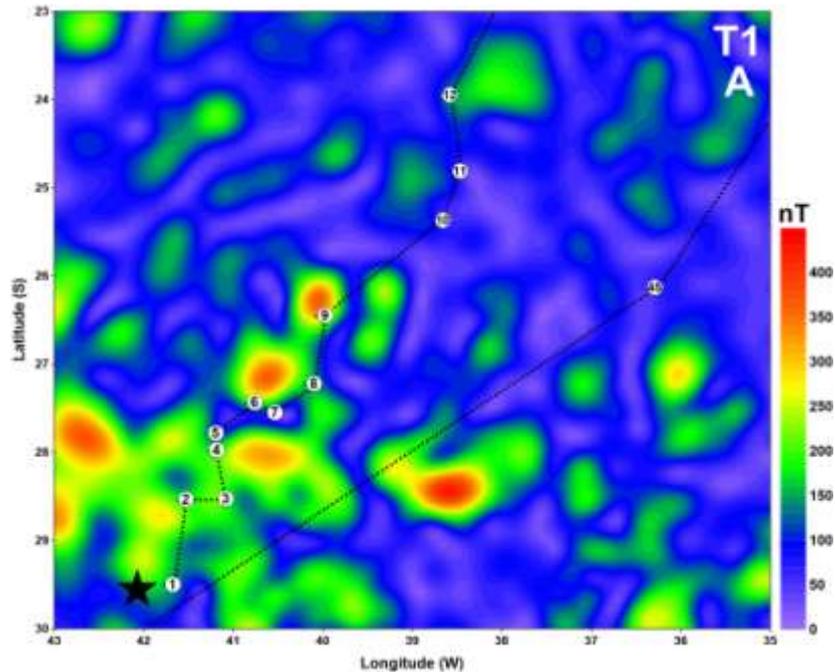


Fig. 4. Distribuição do campo total (F) referente à crosta oceânica, ao nível do mar, sobreposta pela primeira parte (T1-A) do trajeto do espécime T1 (círculos brancos). A estrela preta representa o início do trajeto e a numeração dos pontos brancos indica a ordem de ocupação sequencial das posições. A intensidade de F é indicada em nT.

A Figura 5 mostra o mesmo efeito observado anteriormente, com as seqüências de pontos dispostas nas proximidades de anomalias magnéticas, entre as latitudes 15°S e 23°S. Isto indica que o animal busca evitar regiões com maiores irregularidades, relativas ao campo. O mesmo comportamento pode ser observado na Figura 6 (entre as latitudes 6°S e 15°S) e na Figura 7 (entre as latitudes 30°S e 37°S).

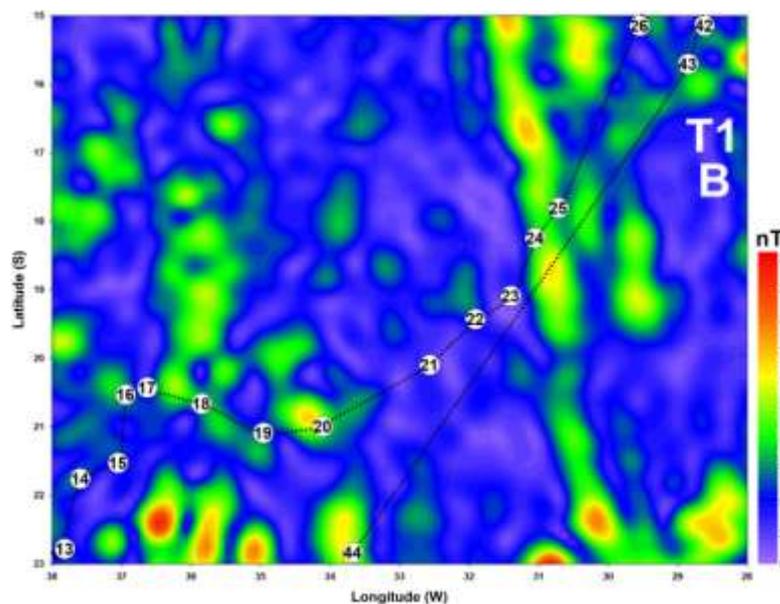


Fig. 5. Distribuição do campo magnético total (F) referente à crosta oceânica, sobreposta pela segunda parte (T1-B) do trajeto do espécime de tartaruga T1 (círculos brancos). A numeração dos pontos brancos indica a ordem de ocupação sequencial das posições ao longo do trajeto. A escala de F está em nT.

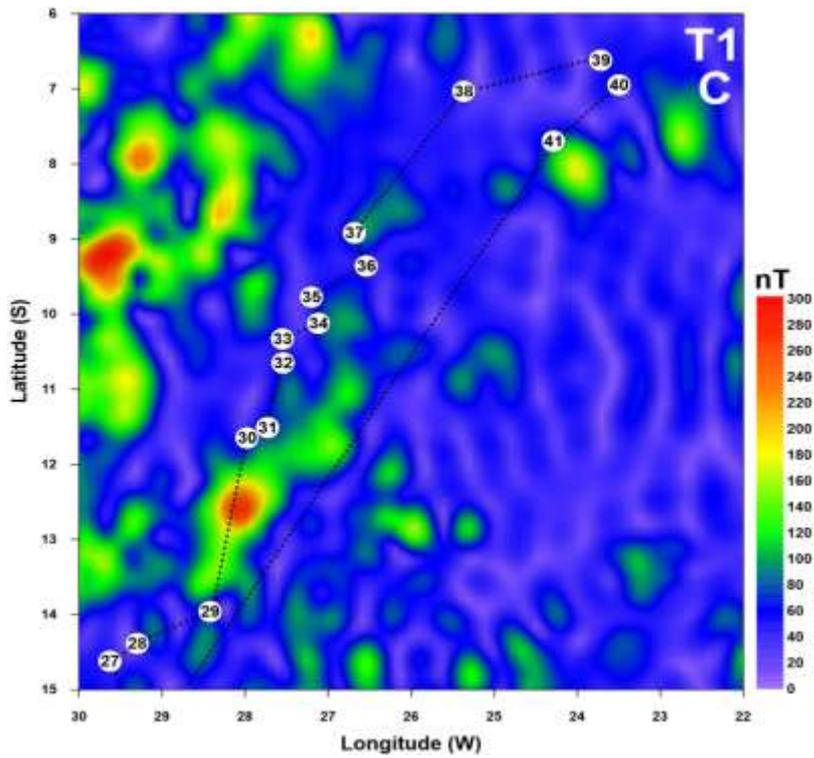


Fig. 6. Distribuição do campo magnético total (F) referente à crosta oceânica, sobreposta pela terceira parte (T1-C) do trajeto do espécime de tartaruga T1 (círculos brancos). Escala de F em nT.

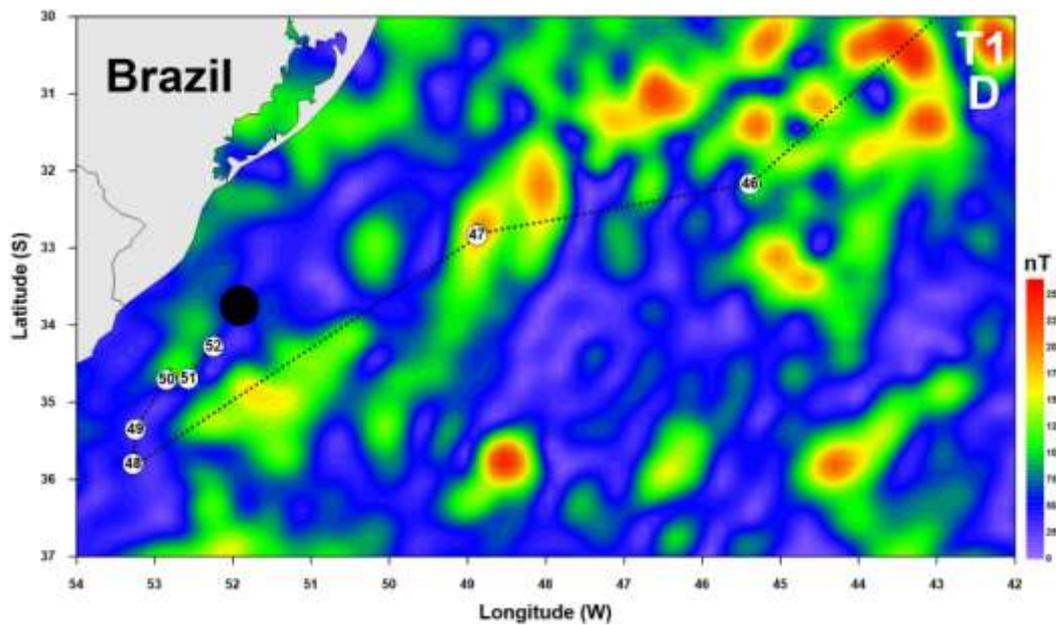


Fig. 7. Distribuição do campo magnético total (F) referente à crosta oceânica, sobreposta pela quarta parte (T1-D) do trajeto do espécime de tartaruga T1 (círculos brancos). O círculo preto mostra o término das medições. A escala de F é indicada em nT.

Uma observação em um escala menor (meio grau por meio grau) foi realizada no entorno de cada ponto do trajeto, encontrando-se a mesma disposição relativa entre a

intensidade do campo e a posição do animal. A Figura 8 mostra algumas destas áreas geográficas (de $0,5^\circ \times 0,5^\circ$, ao redor de cada ponto do trajeto do animal), com a distribuição do campo magnético crustal, em quatro pontos escolhidos aleatoriamente.

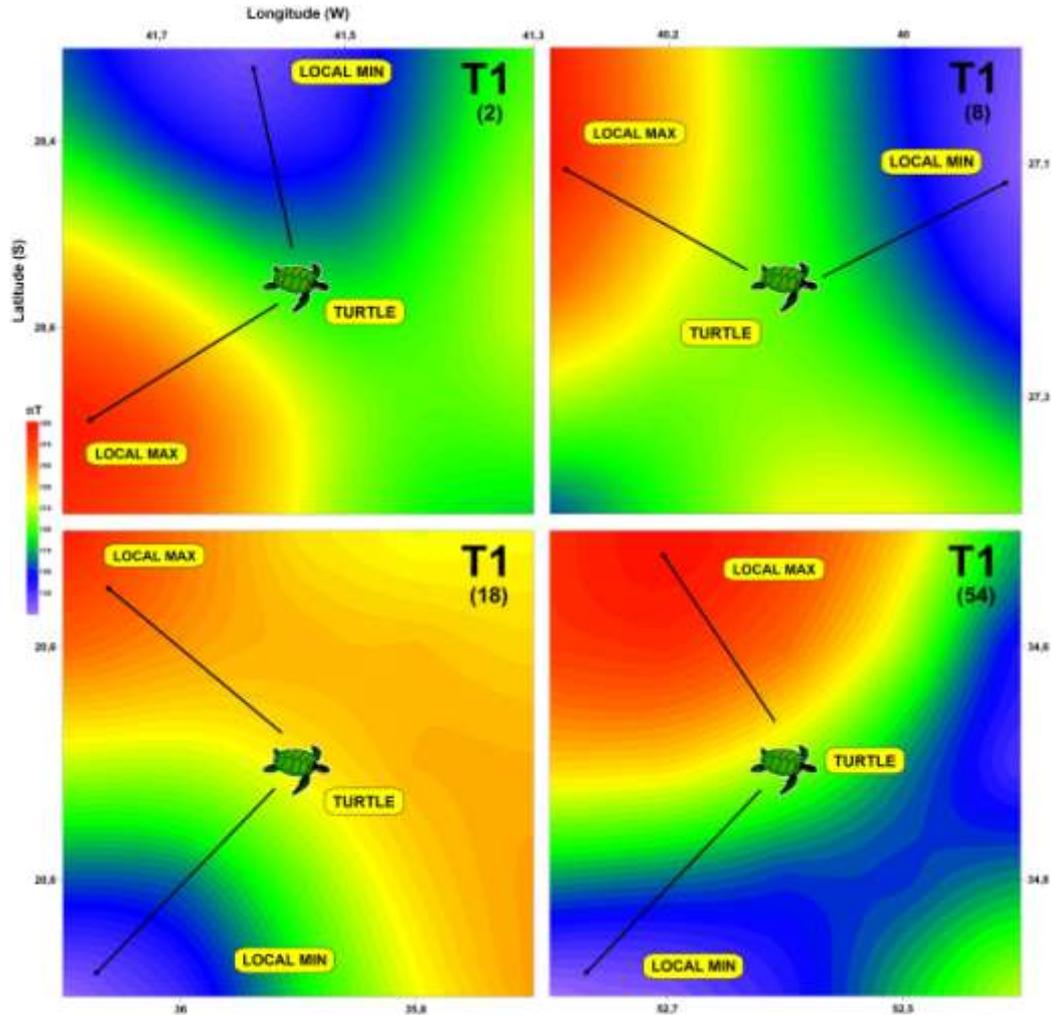


Fig. 8. Distribuição do campo magnético total (F) referente às quatro posições (2, 8, 18 e 54) do trajeto do espécime T1. As nuances de cores (menos intenso em azul, mais forte em vermelho e intermediárias em verde) mostram que o animal navega por regiões de intensidades relativas moderadas do campo.

Uma avaliação numérica foi realizada com todos os 52 pontos de localização oceânica do trajeto deste animal. Registrou-se as intensidades de F para cada posição do espécime, dos máximos, mínimos e médias locais, relativos ao entorno de $0,5^\circ \times 0,5^\circ$ destes pontos. Esta área foi escolhida de forma a capturar as interferências locais, já que uma área maior (por exemplo $1^\circ \times 1^\circ$ ou $2^\circ \times 2^\circ$) adicionaria anomalias mais distantes e que não seriam relevantes no possível direcionamento do animal. A representação destas intensidades é apresentada na Figura 9.

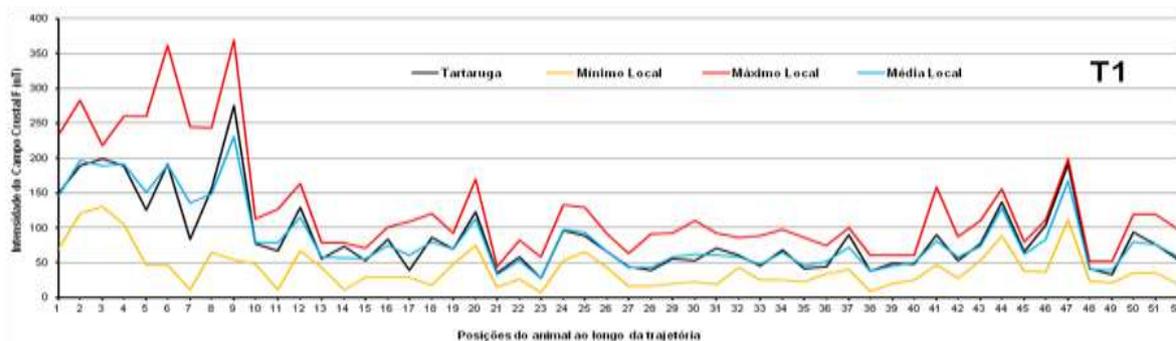


Fig. 9. Disposição das intensidades locais de F (nT) em área de $0,5^0 \times 0,5^0$ ao redor dos 52 pontos do trajeto de T1 (em linha de cor preto). As intensidades máximas estão representadas na cor vermelha, mínimos em laranja e médias em azul.

Nota-se que as intensidades de F, referentes à posições do animal, são, em geral, mais próximas das intensidades médias locais, embora haja algumas exceções ao longo de todo o trajeto. Uma avaliação da intensidade relativa do conjunto de todas as 52 posições é apresentada na Tabela 1.

Tabela 1. Dados relativos entre a intensidade de campo crustal nas posições ocupadas pelo animal (F_t), em regiões do entorno ($0,5^\circ$ por $0,5^\circ$), médias ($F_{\text{médio}}$), máximos (F_{max}) e mínimos (F_{min}) locais para o animal T1, durante toda sua rota migratória (52 posições). Relações estabelecidas nas equações de (2) a (5).

Médias relativas	Valor
F_t	87,43 nT
$F_{\text{médio}}$	85,93 nT
P_1	101,75 %
P_2	1,75%
P_3	46,6 %
P_4	53,4 %

Ao longo de todo o trajeto, a intensidade média de F nas posições ocupadas pelo animal (87,43 nT) é bem próxima à média de F local correspondente (85,93 nT), diferindo uma da outra em apenas 1,75%. A diferença relativa média de F entre máximos locais (46,6%) e mínimos locais (53,4%), mostra que o espécime está próximo da equidistância entre máximos e mínimos (teoricamente em 50%), o que indica uma preferência por posições medianas confortáveis em intensidade.

A análise foi repetida para o espécime T2 (um macho), ao longo de 47 pontos de seu trajeto marinho. Para melhor visualização, o trajeto foi dividido em três partes. As Figuras 10, 11 e 12 mostram como o campo magnético da crosta está distribuído, ao longo destes 47 pontos, entre as latitudes 24°S e 29°S (T2-A), entre latitudes 19°S e 24°S (T2-B) e latitudes 29°S e 36°S (T2-C). Deslocamentos sucessivos mostram uma predominância deste espécime por regiões de menor variação do campo, como foi observado para o espécime T1.

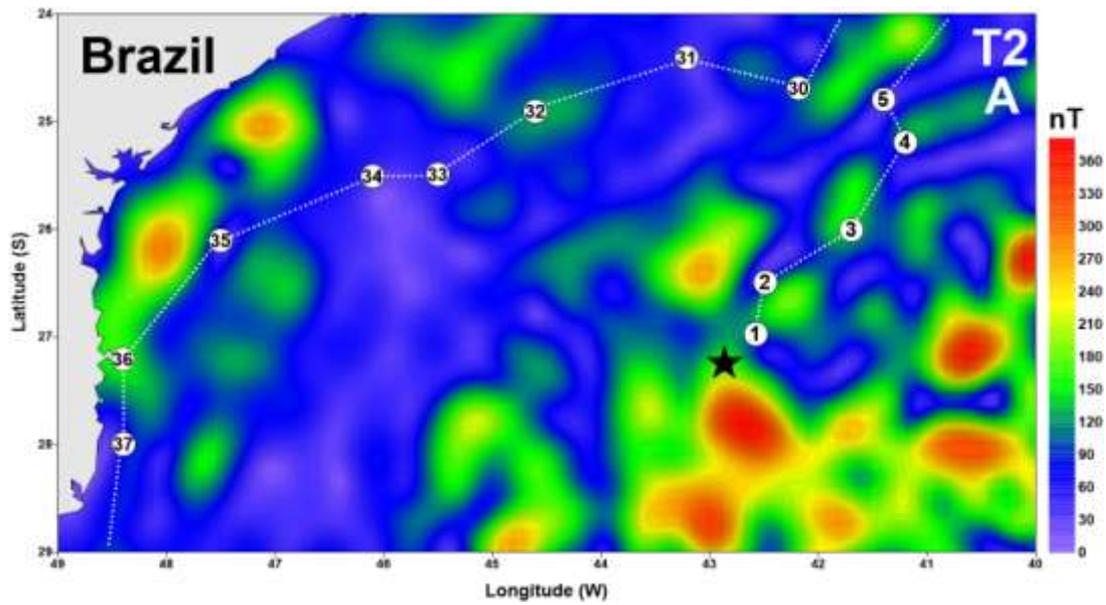


Fig. 10. Distribuição de F referente à crosta, sobreposta pela primeira parte (T2-A) do trajeto do espécime T2 (círculos brancos). A estrela preta representa o início do trajeto e a numeração dos pontos brancos a ordem de ocupação sequencial das posições.

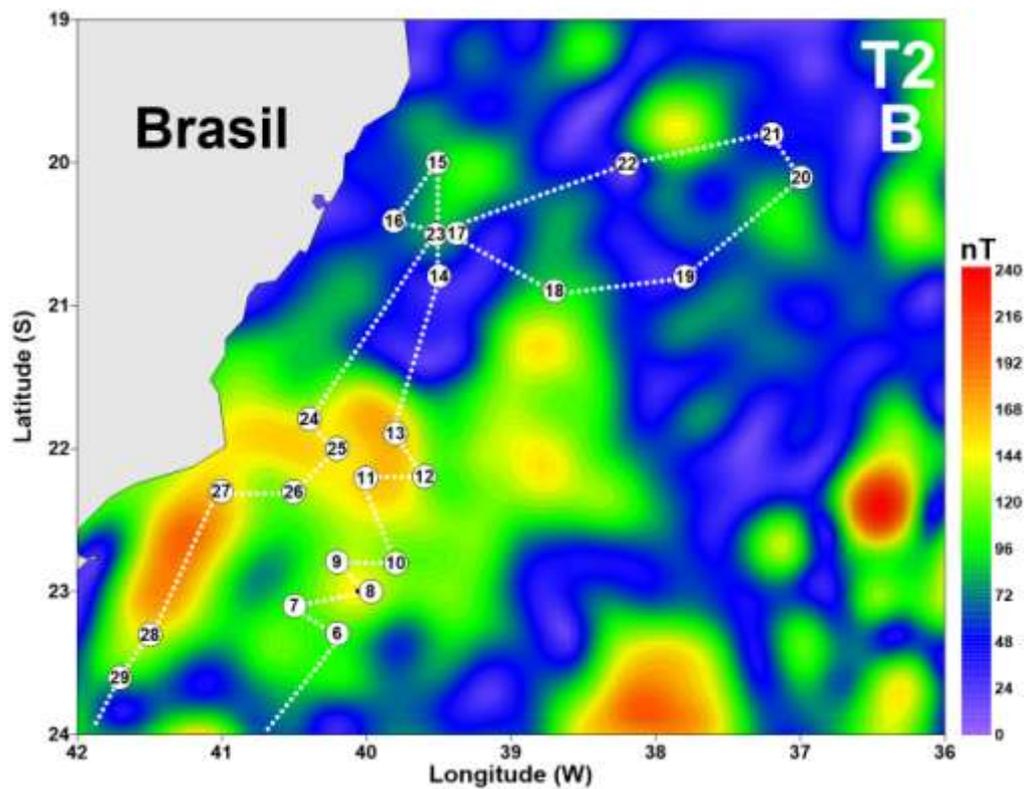


Fig. 11. Distribuição de F referente à crosta oceânica, sobreposta pela segunda parte (T2-B) do trajeto do espécime de tartaruga T2 (círculos brancos sequenciais).

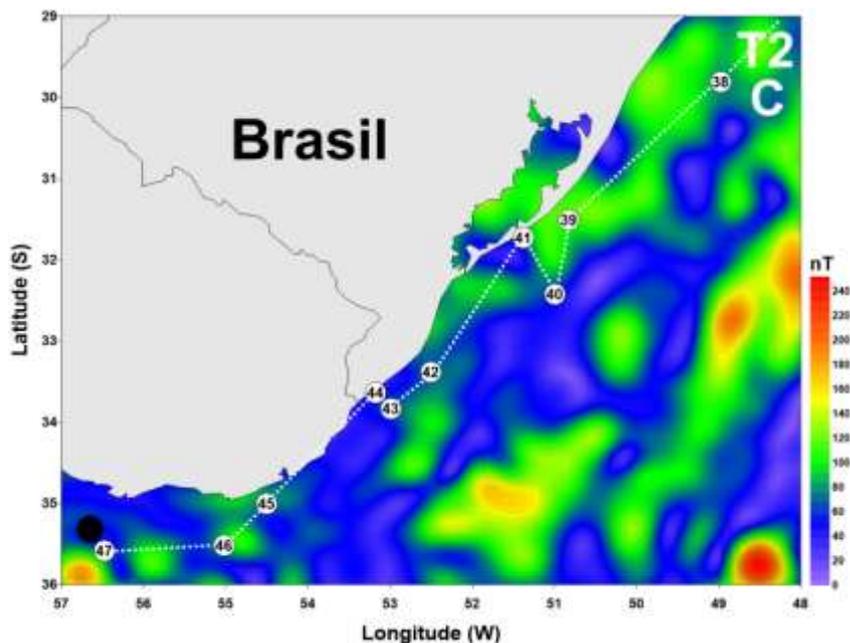


Fig. 12. Distribuição de F referente à crosta, sobreposta pela última parte (T2-C) do trajeto do espécime de tartaruga T2 (círculos brancos). O círculo preto mostra o término das transmissões por satélite.

A projeção do campo crustal, no entorno de quatro posições randômicas do trajeto do espécime T2, é apresentada na Figura 13, mostrando o mesmo comportamento do espécime T1, ou seja, transitando quase sempre por regiões de intensidades locais intermediárias.

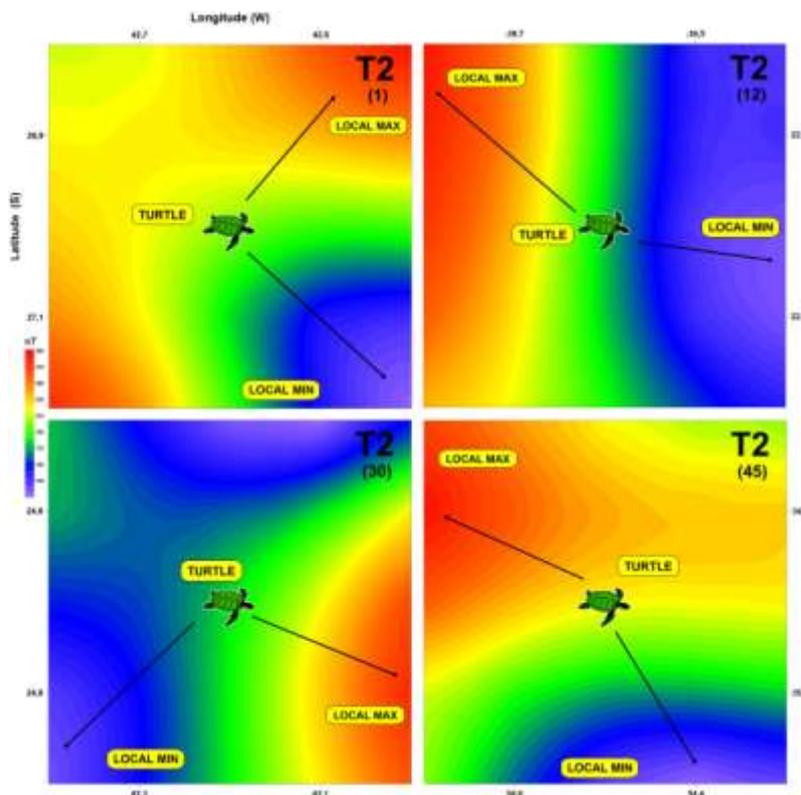


Fig. 13. Distribuição de F, referente às quatro posições (1, 12, 30 e 45) do trajeto do espécime T2. As nuances de cores (menos intenso em azul e mais forte em vermelho) mostra que o animal transita preferencialmente por regiões de intensidades moderadas de campo (cor verde).

Dispondo todas as 47 posições do trajeto de T2, seus respectivos máximos, mínimos e médias locais, obtém-se o gráfico da Figura 14.

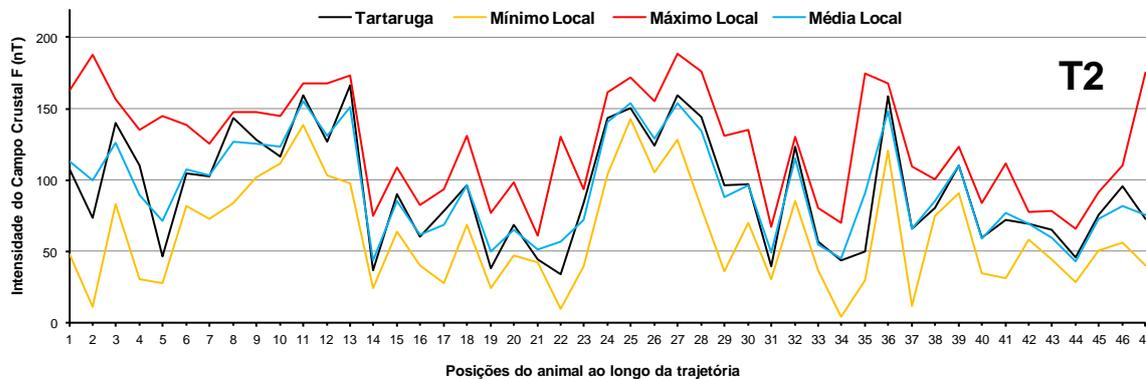


Fig. 14. Disposição de intensidades de F para 47 pontos do trajeto do espécime T2 (em preto). As intensidades (expressas em nT) máximas estão representadas na cor vermelha, mínimos em laranja e médias em azul.

A análise dos resultados mostrados na Fig. 14 indica uma persistente aproximação entre as intensidades dos pontos em que o animal está posicionado (em preto) e as médias locais (em azul), embora isto não seja observado na totalidade dos pontos analisados. Uma avaliação matemática, do percentual de todas as 47 posições do trajeto, é apresentada na Tabela 2.

Tabela 2. Comparativo entre a intensidade de campo crustal das posições ocupadas pelo animal (F_t), na região do entorno ($0,5^\circ \times 0,5^\circ$), médias ($F_{\text{médio}}$), máximos (F_{max}) e mínimos (F_{min}) locais, durante toda sua rota migratória (47 posições). Relações estabelecidas para animal T2, das equações de (2) a (5).

Médias relativas	Valor
F_t	92,65 nT
$F_{\text{médio}}$	93,04 nT
P_1	99,58 %
P_2	-0,42 %
P_3	49,40 %
P_4	50,60 %

Ao longo do trajeto, a intensidade média de F, nas posições ocupadas pelo animal (92,65 nT), é próxima à média local ao longo do percurso (93,04 nT), diferindo uma da outra em apenas 0,42%. A diferença relativa média entre os máximos (49,4%) e mínimos (50,6%) mostra que o espécime está equidistante entre máximos e mínimos (ideal teórico em 50%), mostrando novamente uma zona de conforto, em intensidade, para navegabilidade deste animal.

O êxito alcançado pelas tartarugas marinhas, em longas migrações, sempre foi um grande enigma para a investigação científica, devido à precisão obtida, que, teoricamente só poderia ser conseguida com complexos sistemas de sensoramento (Akesson *et al.*, 2003; Avens, 2003; Lohmann *et al.*, 2007). Variações magnéticas, produzidas artificialmente em laboratório, têm mostrado haver alterações de comportamento destes animais marinhos, o que reforça a tese do mesmo ocorrer em ambiente natural. Assim, estas diminutas variações de campo magnético natural, observadas no presente trabalho, podem estar sendo captadas por sensores biológicos dos animais, como argumenta Johnsen e Lohmann (2008) e Sale e Luschi, (2009).

Estudos realizados por Silva e Araújo (2011) mostram que variações no campo de anomalias magnéticas podem servir de pistas para deslocamentos de tartarugas marinhas. A suposição de que um campo magnético fraco (crosta) podem ser detectados por animais, em contrapartida ao mais forte (principal), sofre sérias críticas, devido à conceituação física dos domínios magnéticos (Backus, 2004). Por este princípio, um domínio magnético é um conjunto de átomos magneticamente polarizados, sobre uma região, e, quando submetidos a um campo externo mais forte, sobrepõe-se a campos menores; um campo médio superior é formado, gerando um domínio local (Novak, 2005). Assim, era de se esperar que o campo ampliado (principal adicionado da crosta) fosse o determinante para a orientação de animais. Assim, o presente trabalho indica a possibilidade de haver um mecanismo biológico, nas tartarugas, que detecta as variações irregulares (anomalias) do campo magnético bipolar. Ao que parece, a taxa de variação parece servir melhor como pista para a percepção biológica do que a relativa constância local do campo magnético principal.

Trabalhos realizados por Lohmann (2010), Putmann *et al.* (2011) e Johnsen e Lohmann (2008) indicam que o campo principal, juntamente com outros parâmetros como intensidade luminosa, temperatura oceânica e correntes oceânicas, poderiam atuar de forma interativa. Esta hipótese esbarra no fato de não se ter informação suficiente para a descrição de alterações comportamentais e biológicas específicas nestes animais.

Estas evidências não são suficientes para a determinação completa de razões científicas do por quê estes trajetos serem tão longos e tão precisos, mas acrescenta um parâmetro adicional na elucidação do complexo problema das longas migrações das tartarugas marinhas.

Referências

- Alerstam, T. (2003). **Animal Behavior: The lobster navigators.** *Nature* 421, 27-28.
- Akesson, S.; Broderick, A.C.; Glen, F.; Godley, B.J.; Luschi, P.; Papi, F. e Hays, G.C. (2003). **Navigation by green turtles: which strategy do displaced adults use to find Ascension Island?** *Oikos* 103: 363–372.
- Avens, L.I. (2003). **Homing Behavior, Navigation and Orientation of Juvenile Sea Turtles.** Doctor dissertation at University of North Carolina at Chapel Hill. North Carolina, USA. 127p.
- Backus, G.; Parker, R. e Constable, C. (2004). **Foundations of Geomagnetism.** Cambridge University Press, 384p, Oxford. ISBN 10: 0521017335.
- Benson R.S.; Dutton P.H.; Hitipeuw C.; Samber B.; Bakarbessy J. e Parker D. (2007). **Post-Nesting Migrations of Leatherback Turtles (*Dermochelys coriacea*) from Jamursba-Medi, Bird's Head Peninsula, Indonesia** *Chelonian Conservation and Biology*, 6(1): 150–154.
- Butler, R.F. (2004). **Paleomagnetism: Magnetic Domains to Geologic Terranes.** Electronic Edition. Department of Chemistry and Physics, 238p. University of Portland, Portland, Oregon, USA.
- Campbell, W.H. (2003). **Introduction to Geomagnetic Fields.** Cambridge University Press. 179p.
- Den Hartog, J.C. (1980). **Notes on the food of sea turtles: *Eretmochelys imbricata* (Linnaeus) and *Dermochelys coriacea* (Linnaeus).** *Netherlands Journal of Zoology* 30: 595-610.
- Eckert, S.A. (2002). **Swim speed and movement patterns of gravid leatherback sea turtles (*Dermochelys coriacea*) at St. Croix, U.S. Virgin Islands.** *J Exp Biol* 205:3689–3697.
- Eckert, S.A.; Eckert K.L.; Ponganis, P. e Kooyman, G.L. (1989). **Diving and foraging behaviour of leatherback sea turtles (*Dermochelys coriacea*).** *Can J Zool* 67:2834–2840.
- EMM. (2010). **Enhanced Magnetic Model.** National Oceanic and Atmospheric Administration (NOAA) and National Geophysical data Center (NGDC). National Geophysical Data Center, EGC/2, 325 Broadway, Boulder, CO 80303, USA. Disponível em <<http://www.ngdc.noaa.gov/geomag/EMM/emm.shtml>>, acesso em 15/03/2012.
- Ferraroli, S.; Georges, J.Y.; Gaspar, P. e Maho, Y.L. (2004). **Where leatherback turtles meet fisheries.** *Nature* 429, 521–522.
- Golden Software. Surfer 11. (2012). **Surface mapping system manual, version 11.** Golden, Colorado. Disponível em <www.goldensoftware.com>, acesso em 12/05/2012.

- Gubbins, D. and Herrero-Bervera, E. (2007). **Encyclopedia of Geomagnetism and Paleomagnetism**. 1080p. Ed. Springer-Verlag, New York, USA.
- Hays, G.C.; Hobson, V.J.; Metcalfe, J.D.; Righton, D. e Sims, D.W. (2006). **Flexible foraging movements of leatherback turtles across the North Atlantic Ocean**. *Ecology* 87, 2647–2656.
- Hays, C. G.; Akesson, S.; Broderick, A. C.; Glen, F.; Godley, B. J.; Papi, F. e Luschi, P. (2003). **Island-finding ability of marine turtles**. *Proc. R. Soc. Lond. B*, 270, Suppl 1, S5-S7.
- James, C.M.; Eckert, S.A. e Myers, R.A. (2005). **Migratory and reproductive movements of male leatherback turtles (*Dermochelys coriacea*)**. *Marine Biology* 147: 845–853.
- James, M.C.; Davenport, J. e Hays, G.C. (2006). **Expanded thermal niche for a diving vertebrate, a leatherback turtle diving into near-freezing water**. *J. Exp. Mar. Biol. Ecol.* 335, 221–226.
- Johnsen, S. e Lohmann, K.J. (2008). **Magnetoreception in animals**. *Phys. Today* 61 (3), 29–35.
- Lohmann, K.J.; Lohmann, C.M.F. e Putman, N.F. (2007). **Magnetic Maps in animals: nature's GPs**. *J. Exp. Biol.* 210, 3697–3705.
- Lohmann, K.J.; Lohmann, C.M.F. e Endres, C.S. (2008). **The sensory ecology of ocean navigation**. *The Journal of Experimental Biology* 211, 1719-1728.
- Lohmann, K.J. (2010). **Magnetic-field perception – Animal Behavior**. *Nature*, Vol. 464. 1140-1142. Macmillan Publishers Limited.
- López-Mendilaharsu M.; Rocha, C.F.D; Miller, P.; Domingo, A. e Prosdocimi, L. (2009). **Insights on leatherback turtle movements and high use areas in the Southwest Atlantic Ocean**. *Journal of Experimental Marine Biology and Ecology* 378, 31–39.
- Luschi, P.; Åkesson, S.; Broderick, A.C.; Glen, F.; Godley, B.J.; Papi, F. e Hays, G.C. (2001). **Testing the navigational abilities of ocean migrants: displacement experiments on green sea turtles (*Chelonia mydas*)**. *Behav. Ecol. Sociobiol.* 50, 528-534.
- Luschi, P.; Lutjeharms, J.R.E.; Lambardi, P.; Mencacci, R.; Hughes, G.R. e Hays, G.C. (2006). **A review of migratory behaviour of sea turtles off southeastern Africa**. *S. Afr. J. Sci.* 102, 51–58.
- Lutz, P.L. e Musick, J.A. (1997). **The Biology of Sea Turtles**. CRC Press, Boca Raton, Florida, 432 p.
- Machado, A.B.M; Drummond, G.M. e Paglia, A.P. (eds) (2008). **Livro Vermelho da Fauna Brasileira Ameaçada de Extinção**. Volume II. 1.ed. Brasília, DF: Ministério do Meio Ambiente. 906 p.
- Matzner, R.A. (2001). **Dictionary of Geophysics, Astrophysics and Astronomy**. Ed. CRC Press, 526p, USA.

Miranda, J.M.A. (2004). **Introdução ao Geomagnetismo**. Ed. Centro de Geofísica da Universidade de Lisboa, 250p, Lisboa, Portugal.

Novak, M.A. (2005). **Introdução ao Magnetismo**. Escola Brasileira de Magnetismo. Instituto de Física. Universidade Federal do Rio de Janeiro. Notas de Aulas. CBPF-MCT. Disponível em <http://www.cbpf.br/~labmag/miguel.pdf>.

Putman, N.F.; Endres, C.S.; Lohmann, C.M.F. e Lohmann, K.J. (2011). **Longitude Perception and Bicoordinate Magnetic Maps in Sea Turtles**. *Current Biology*, 21, 463-466.

Sale, A. e Lush, P. (2009). **Navigational challenges in the oceanic migrations of leatherback sea turtles**. *Proc. R. Soc. B* 276, 3737–3745.

Seminoff, J.A.; Zárata, P.; Coyne, M.; Foley, D.G.; Parker, D.; Lyon, B.N. e Dutton, P.H. (2008). **Post-nesting migrations of Galápagos green turtles (*Chelonia mydas*) in relation to oceanographic conditions: integrating satellite telemetry with remotely sensed ocean data**. *Endangered Species Research* 4, 57-72.

Silva, G.P e Araújo, T.C.M. (2011). **Green Turtles and the Crust's magnetic Field**. *Ciencia y Tecnología del Mar*, Vol. 34 (1). Edição eletrônica disponível em <http://www.cona.cl/ctmol2/vol34_1_2/indice-general.htm>. Acesso em 12/06/2013.

Southwood, A.L.; Andrews, R.D.; Lutcavage, M.E.; Paladino, F.V.; West, N.H.; George, R.H. e Jones, D.R. (1999) **Heart rates and diving behaviour of leatherback sea turtles in the eastern Pacific Ocean**. *J Exp Biol* 202:1115–1125.

Teixeira, W.; Toledo, M.C.M.; Fairchild, T.R. e Taioli, F. (Orgs.). (2009). **Decifrando a Terra**. São Paulo: Oficina de Textos, 568 p.

Willis, J.; Phillips, J.; Muheim, R.; Rasilla, F.J.D. e Hobday, A.J. (2009). **Spike dives of juvenile southern bluefin tuna (*Thunnus maccoyii*): a navigational role?**. *Behavioural Ecology and Sociobiology* 64, 57-68.

WMM. (2010). **World Magnetic Model**. *The US/UK World Magnetic Model for 2010/2015*. British Geological Survey, Technical Report, Macmillan S, Quinn J M. 2010. Disponível em <<http://www.ngdc.noaa.gov/geomag/WMM/>>, acesso em 01/07/2012.

CONSIDERAÇÕES FINAIS

Conclusões

Após a utilização da metodologia, descrita no Capítulo 3, e análises dos resultados obtidos nos Capítulos 4, 5, 6 e 7, verifica-se que os objetivos do trabalho foram alcançados. Com os resultados expostos em forma de quatro artigos, dois investigando o campo de anomalias magnéticas e outros dois a intensidade total de campo, foram encontradas evidências que validam os objetivos propostos, ou seja, de influência magnética em movimentos oceânicos de tartarugas marinhas.

Através das informações coletadas, foi possível estabelecer uma relação entre deslocamentos oceânicos de tartarugas marinhas, tanto tartarugas-verdes (*Chelonia mydas*) quanto tartarugas-de-couro (*Dermochelys coriacea*), e o campo magnético terrestre. Esta relação fica clara quando se observa a presença de anomalias magnéticas, geradas pela contribuição da crosta terrestre, ao longo de regiões marinhas nas quais os animais investigados transitaram. Ao contrário do encontrado por outros experimentos da literatura especializada (realizados em laboratório, e não envolvendo animais no meio natural), verificou-se ser a variabilidade produzida pela contribuição do campo magnético da crosta terrestre, o fator preponderante na trajetória destes animais. Existe uma relação entre as trajetórias e esta variabilidade.

A observação visual dos mapas de deslocamento, comparadas às variações do campo de anomalias e de intensidades, mostraram que estes animais buscam evitar regiões com variações abruptas de campo (anomalias), preferindo navegar por regiões geomagnéticas com menor variação, ou zonas de conforto. No entanto, os desvios destas anomalias não ocorrem ao longo de todo o trajeto, e sim em sua maioria, o que leva a crer que o campo magnético da crosta parece não ser o único parâmetro de informação utilizado pelo animal. Um conjunto de fatores parece fornecer contribuições ao sensoramento geral das tartarugas marinhas, e o campo magnético aparenta estar entre as informações sensoriais captadas por estes animais; às quais podem estar também as correntes marinhas, os estímulos visuais (posição do Sol), temperatura, entre outros.

Avaliações realizadas, em distintas regiões oceânicas do globo (Capítulo 4), mostra haver um comportamento comum destes animais quando, em trilhas próprias, procuram fazer desvios próximos a regiões com maior variação do campo de anomalias. Em um estudo mais específico, e em dimensões geográficas reduzidas (Capítulo 5), os animais mostraram sua

prioridade por uma janela de variação, cujas intensidades no campo de anomalias magnéticas estão entre -50 e +50 nT.

Quando se investigou a migração de tartarugas-verdes que deixavam o Arquipélago de Galápagos (Capítulo 6) foi verificado haver uma espécie de “topografia geomagnética” (regiões de oscilações do campo da crosta), passível de influenciar no sentido de orientação destes animais. Ao se observar em uma escala geográfica menor, a maioria dos animais optou por regiões com menor variabilidade relativa local. A diferença de intensidade entre os locais em que os animais estiveram e a média local não ultrapassou 8%, mostrando uma escolha comum pela variação local de intensidade intermediária no campo. A mesma análise, realizada com uma espécie diferente da de Galápagos, a tartaruga-de-couro, em uma região distinta (Capítulo 7), localizada no Oceano Atlântico, mostrou o mesmo comportamento. Os animais deslocaram-se por milhares de quilômetros, em regiões onde a diferença entre a média de campo do entorno e nas posições dos animais, não diferia em 2%.

Embora não haja exatidão completa nos dados apurados, já que são derivados de medidas por satélite e modelos matemáticos globais, possuindo, assim, uma imprecisão para grandes regiões, pode-se observar que em deslocamentos oceânicos os animais, mesmo de espécies distintas, são capazes de utilizar variações do campo magnético terrestre (crosta), como um dos parâmetros de escolha. O estudo da percepção magnética ainda está no início, pois não são conhecidas ainda as diversas etapas dos complexos mecanismos biológicos que ocorrem no interior das tartarugas marinhas. É plausível haver alguma forma de sensibilidade animal a fracas variações de intensidades, capazes de assinalar regiões oceânicas onde o campo não é contínuo. Isto já foi registrado para outras espécies terrestres, tais como cães e aves, que são capazes de perceber sutis variações de sons e correntes de ar, localizando alvos a dezenas de quilômetros do ponto de partida.

Desta forma, pode-se destacar o campo magnético da crosta terrestre como um dos fatores que contribui com o mecanismo de navegação de tartarugas marinhas, embora os mecanismos biológicos internos ao animal ainda sejam desconhecidos.

Recomendações Finais

O estudo da dinâmica de espécies marinhas ameaçadas de extinção, como o caso de muitas espécies de tartarugas marinhas, é fundamental na estruturação de programas internacionais de preservação destas espécies. As tartarugas marinhas estão no planeta a milhões de anos, e sua adaptação às condições ambientais surpreende biólogos, físicos, químicos e geólogos. A sua forma de interação com o meio ambiente contribui com o entendimento do habitat marinho, e de como a cadeia alimentar mantém-se sustentável. Pode-se aprender muito com os hábitos destes animais, de forma que avanço na melhoria da qualidade da pesquisa científica nesta área pode impactar na melhoria da preservação de inúmeras outras espécies, que a ela se relacionam.

Dentre as recomendações para a melhoria da qualidade de futuras investigações nesta área de estudo, pode-se registrar:

- A necessidade de atualização contínua dos modelos geomagnéticos mundiais utilizados (WMM e EMM), através da aquisição de dados por magnetômetros com maior precisão, tanto instalados em estações geomagnéticas quanto em satélites, em órbita terrestre.
- A utilização, em tartarugas marinhas, de marcadores de telemetria por satélite em intervalos de tempo menores, fazendo com que o acompanhamento seja mais contínuo e conciso.
- A instalação de magnetômetros em embarcações náuticas, para o acompanhamento conjunto e “in loco” tanto do campo geomagnético quanto das posições de animais em mar aberto.
- A necessidade de medidas de posicionamento oceânico para casos sucessivos de animais já registrados com etiquetas, ou seja, a repetição com o mesmo animal para comparativo da história de migrações anteriores.
- Aplicação da metodologia, utilizada em tartarugas marinhas, para movimentos oceânicos de outras espécies, tais como o tubarão, na busca de padrões migratórios orientados por magnetismo.

REFERÊNCIAS

- Acuña, M.H.; Connerney, J.E.P.; Ness, N.F.; Lin, R.P.; Mitchell, D.; Carlson, C.W.; McFadden, J.; Anderson, K.A.; Réme, H.; Mazelle, C.; Vignes, D.; Wasilevski, P. e Cloutier, P. (1999). **Global Distribution of Crustal Magnetization Discovered by the Mars Global Surveyor MAG/ER Experiment**. *Science*, 284, 790-3.
- Akesson, S.; Broderick, A.C.; Glen, F.; Godley, B.J.; Luschi, P.; Papi, F. e Hays, G.C. (2003). **Navigation by green turtles: which strategy do displaced adults use to find Ascension Island?** *Oikos* 103: 363–372.
- Alexandrescu, M.; Gilbert, D.; Hulot, G.; Lemouel, J. e Saracco, G. (1996). **Worldwide Wavelet analysis of geomagnetic jerks**. *Journal of Geophysical Research*, vol. 101, B10, 21,975-21,994.
- Argos System. (2012). **Worldwide Tracking and Environmental Monitoring by Satellite**. Argos User's Manual. Disponível em <<http://www.argos-system.org>>. Acesso em 15/04/2012.
- Avens, L.I. (2003). **Homing Behavior, Navigation and Orientation of Juvenile Sea Turtles**. Doctor dissertation at University of North Carolina at Chapel Hill. North Carolina, USA. 127p.
- Backus, G.E.; Parker, R. e Constable, C. (1996). **Foundations of Geomagnetism**. Cambridge University Press, Cambridge, 369p.
- Barracough, D.R. (2000). **Four hundred years of geomagnetic Field charting and modeling, in Geomagnetism (Research: Past and Present)**. Edited by W. Schroder, pp. 93-111, Wilfried Schroder, Bremen-Roennebeck, Germany.
- Bloxham, J. e Gubbins, D. (1989). **The evolution of the Earth's magnetic field**. *Scientific American*, 261, p68.
- Bolton, A.B. e Witherington, B.E. (Editors). (2003). **Loggerhead sea turtles**. Smithsonian Institution, Washington, DC, 311p.
- Boström, J.E.; Åkesson, S. e Alerstam, T. (2012). **Where on earth can animals use a geomagnetic bi-coordinate map for navigation?** *Ecography* 35: 1039-1047.
- Boyd, T. (2012). **Introduction on Geophysics Exploration**. Notes on School of Mines, Colorado, USA. Disponível em <http://www.mines.edu/>. Acesso em 05/08/2012.
- Butler, R.F. (2004). **Paleomagnetism: Magnetic Domains to Geologic Terranes**. Electronic Edition. Department of Chemistry and Physics. University of Portland. Blackwell Scientific Publications, Portland, Oregon. USA, 310p.
- Campbell, W.H. (2003). **Introduction to Geomagnetic Fields**. Cambridge University Press. 179p.
- CHAMP. (2012). **CHALLENGING Minisatellite Payload**. German Research Centre for Geosciences. The CHAMP Mission. Disponível em <<http://op.gfz-potsdam.de/champ/>>. Acesso em 12/02/2012.

- Cheng, I.J. (2000). **Post-nesting migrations of green turtles (*Chelonia mydas*) at Wan-An Island, Penghu Archipelago, Taiwan.** *Mar. Biol.* 137, 747-754.
- Clark, T.D.G. (2000). **Edmond Halley's voyages of the Paramore and the first isogonic chart of the Earth's magnetic field, in Geomagnetism (Research: Past and Present).** Edited by W. Schroder, pp. 61-71, Wilfried Schroder, Bremen-Roennebeck, Germany.
- Coe, R.S.; Hongre, L. e Glatzmaier, G.A. (2000). **An examination of simulated geomagnetic reversal from a paleomagnetic perspective.** *Philos, Trans. R. Soc., Ser. A*, 358, 1141-1170.
- Dal Poz, W.R. (2005). **Posicionamento Relativo na Região Equatorial em Diversas Condições Ionosféricas.** 161p. Dissertação – Programa de Pós-Graduação em Ciências Cartográficas, Faculdade de Ciências e Tecnologia, Universidade Estadual Paulista, Presidente Prudente, SP.
- Dekkers, M.J. (1997). **Environmental Magnetism: An Introduction.** *Geologie En Mijnbouw, Netherlands Journal of Geosciences* , 76, 163-182.
- Eckert, K.L. e Beggs, J. (2006). **Marine Turtle Tagging: A Manual of Recommended Practices.** WIDECASST Technical Report No. 2. Revised Edition. Beaufort, North Carolina. 40 pp.
- EMAG2. (2012). **EMAG2: Earth Magnetic Anomaly Grid (2-arc-minute resolution).** Descrição do modelo disponível em <<http://geomag.org/models/emag2.html>>. Acesso em 12/03/2012.
- EMM2010. (2012). **The Enhanced Magnetic Model (EMM2010).** The model and softwares. Disponível a pesquisadores em <<http://www.ngdc.noaa.gov/geomag/EMM/index.html>>. Acesso em 08/12/2012.
- Evans, M.E e Heller, F. (2003). **Environmental Magnetism: Principles and Applications of Enviromagnetics.** Academic Press. ISBN 0-12-243851-5.
- Friis-Christensen, E.; Lühr, H. e Hulot, G. (2006). **Swarm: A Constellation to Study the Earth's Magnetic Field.** *Earth Planets Space* 58, 351-358.
- Gerrodette, T. e Taylor, B.L. (1999). Estimating population size, pp. 67-71. In: K. L. Eckert, K. A. Bjorndal, F. A. Abreu Grobois and M. Donnelly (eds), **Research and Management Techniques for the Conservation of Sea Turtles.** IUCN/SSC Marine Turtle Specialist Group Publication No. 4. Washington D.C. [http://www.iucnmtsg.org/Publications/Tech_Manual/Tech_Manual_en/12-gerrodette&taylor.pdf].
- Gilbert, W. (1991). **De Magnete.** English translation by P. Mottelay of original 1958. Dover Publications, 427p.
- Girard, C.; Sudre, J.; Benhamou, S.; Roos, D. e Luschi, P. (2006). **Homing in green turtles *Chelonia mydas*: oceanic currents act as a constraint rather than as an information source.** *Mar. Ecol. Prog. Ser.* 322, 281-289.

- Glatzmaier, G.A. e Roberts, P.H. (1995). **A three-dimensional self-consistent computer simulation of a geomagnetic field reversal**. *Nature*, 377, 203-209.
- Godley, B.J.; Almeida, A.; Barbosa, C.; Broderick, A.C.; Catry, P.X.; Hays, G.C. e Indjai, B. (2003). **Using satellite telemetry to determine post-nesting migratory corridors and foraging grounds of green turtles nesting at Poilão**. Guinea Bissau: Report to project donors. Unpublished Report, Marine Turtle Research Group, School of Biological Sciences, University of Wales Swansea, Swansea SA2 8PP, UK. Disponível em <www.seaturtle.org/mtrg>.
- Golden Software (2012). **User's Manual of SURFER11 and VOXLER3**. Disponível em <<http://www.goldensoftware.com/>>. Acesso em 12/03/2012.
- Good, G.A. (1991). **Follow the needle: Seeking the magnetic poles**. *Earth Sci. Hist.*, 10, 154-167.
- Gubbins, D. e Herrero-Bervera, E. (2007). **Encyclopedia of Geomagnetism and Paleomagnetism**. Ed. Springer-Verlag, New York, USA, 1080p.
- Gulko, D.A. e Eckert, K.L. (2003). **Sea Turtles, an Ecological Guide**. Mutual Publishing, Honolulu, HI, 128 p.
- Haagmans, R.; Kern, M. e Plank, G. (2008). **The Earth's Magnetic Field and Environment Explorers**. Presentation at RSSD Seminar, ESTEC.
- Hemant, K. e Maus, K. (2003). **A Comparison of Global Lithospheric Field Models Derived from Satellite Magnetic Data**. In: First CHAMP Mission Results for Gravity, Magnetic and Atmospheric Studies (Eds.: Reigber, C., Lühr, H., Schwintzer, P.), 261-268. Springer, Heidelberg.
- Halliday, D.; Resnik R. e Krane, D. S. (2004). **Física 3**. Volume 2, 5.Ed, Rio de Janeiro: LTC, 384 p.
- Hulot, G.; Finlay, C.C.; Constable, C.G.; Olsen, N. e Manda, M. (2010). **The Magnetic Field of Planet Earth**. *Space Sci. Rev.* 152, 159-222.
- IGAG. (2012). **The International Geomagnetic Reference Field**. International Association of Geomagnetism and Aeronomy. 11th Generation - IGRF11. Descrição do modelo disponível em <<http://www.ngdc.noaa.gov/IGAG/vmod/home.html>>. Acesso em 04/05/2012.
- Inmetro. (2013). **Metrologia Científica**. Tabelas de conversão de unidades magnéticas. Disponível em <<http://www.inmetro.gov.br/metcientifica/materiais/lamag.asp>>. Acesso em 03/09/2013.
- Jackson, A.; Jonkers, R.T. e WalkerPhil, M.R. (2000). **Four centuries of geomagnetic secular variation from historical records**. *Trans. R. Soc. Lond.* A358, 957-990.
- Jackson, A. (2003). **Intense Equatorial flux spots on the surface of the earth's core**. *Nature*, vol. 424, 760-763.

- Johnsen, S. e Lohmann, K.J. (2008). **Magnetoreception in animals**. Phys. Today 61 (3), 29–35.
- Keary, P. e Vine, F.J. (1990). **Global Tectonics**. Blackwell Scientific Publications. 302 p.
- Kearey, P.; Brooks, M. e Hill, Y. (2002). **An Introduction to Geophysical Exploration**. Blackwell Science Ltd, 281p.
- Langel, R.A. e Hinze, W.J. (2011). **The Magnetic Field of the Earth's Lithosphere: The Satellite Perspective**. Cambridge University Press, Cambridge, 450p.
- Lanza, R. e Meloni, A. (2006). **The Earth's Magnetism: An Introduction for Geologists**. Springer-Verlag. Berlin-Heidelberg. 287p.
- Larmor, J. (1929). **Possible rotational origin of magnetic fields of Sun and Earth, in Mathematical and Physical**. Papers by Sir Joseph Larmor, vol. 2, pp. 611–612, Cambridge Univ. Press, New York.
- Liu, Q.; Roberts, A.P.; Larrasoaña, J.C.; Banerjee, S.K.; Guyodo, Y.; Tauxe, L. e Oldfield F. (2012). **Environmental magnetism: Principles and applications**. Rev. Geophys., 50, RG4002, doi:10.1029/2012RG000393.
- Lohmann, K.J.; Lohmann, C.M.F. e Putman, N.F. (2007). **Magnetic Maps in animals: nature's GPs**. J. Exp. Biol. 210, 3697-3705.
- Lohmann K.J.; Lohmann C.M.F. e Endres, C.S. (2008). **The sensory ecology of ocean navigation**. The Journal of Experimental Biology 211. 1719-1728.
- Lohmann, K.J. (2010). **Magnetic-field perception – Animal Behavior**. Nature, Vol. 464. 1140-1142. Macmillan Publishers Limited.
- Lowrie, W. (2004). **Fundamentals of Geophysics**. Cambridge University Press. ISBN 0-521-46164-2, 393p.
- Luschi, P.; Hays, G. C.; Del Seppia, C.; Marsh, R. e Papi, F. (1998). **The navigational feats of green sea turtles migrating from Ascension Island investigated by satellite telemetry**. Proceedings of The Royal Society Biology 265, 2279-2284.
- Lutz, P.L.; Musick, J.A. e Wyneken J. (Editors). (2003). **The biology of sea turtles**. Volume II. CRC Press, Boca Raton, Florida. 455 p.
- Maier, T. (2003). **Multiscale Geomagnetic Field Modeling from Satellite Data – Theoretical Aspects and Numerical Applications**. PhD Thesis, Geomathematics Group, University of Kaiserslautern, Germany.
- Matzner, R.A. (2001). **Dictionary of Geophysics, Astrophysics and Astronomy**. Ed. CRC Press ISBN 0-8493-2891-8, USA, 536p.
- Maus, S. (2007). **CHAMP: Magnetic Mission**. In: Encyclopedia of Geomagnetism and Paleomagnetism (Eds.: Gubbins, D., Herrero-Bervera, E.), 59-60. Springer, Heidelberg.

- Miranda, J.M.A. (2004). **Introdução ao Geomagnetismo**. Ed. Centro de Geofísica da Universidade de Lisboa, 250p, Lisboa, Portugal.
- Multhauf, R.P. (1987). **A brief history of geomagnetism and a catalog of the collections of the National Museum of American History**. Smithsonian studies in history and technology , no. 48.
- NASA Models. (2012). **The Models of Earth's Magnetic Field**. National Space Agency, USA. Disponível em < <http://ccmc.gsfc.nasa.gov/modelweb/>>. Acesso em 20/06/2012.
- National Research Council. (1990). **Decline of the Sea Turtles. Causes and Preventions**. National Academy Press, Washington, DC, 259 p.
- NOAA. (2007). **Technical Memorandum NMFS-SEFSC-555**. Turtle Expert Working Group. An Assesment of the Leatherback Turtle Population in the Atlantic Ocean, 116p.
- NOAA. (2012). **Fisheries - Office of Protected Resources. Marine Turtles**. Disponível em <<http://www.nmfs.noaa.gov/pr/species/turtles/>>. Acesso em 08/06/2012.
- NOAA-Space Weather. (2013). **Space Weather Prediction Center**. National Oceanic and Atmospheric Agency. Disponível em <<http://www.swpc.noaa.gov/SWN/index.html>>. Acesso em 03/09/2013.
- NMFS/SEFSC (2008). **National Marine Fishery/Service Southeast Science Center. Sea Turtle Research Technics Manual**. NOAA Technical Memorandum FNMFS/SEFSC-579, 92p.
- O'Connell, C.P.; Gruber, S.H.; Abel, D.C.; Stroud, E.M. e Rice, P.H. (2011). **The responses of juvenile lemon sharks, *Negaprion brevirostris*, to a magnetic barrier**. Ocean Coast. Manag. 54(3): 225-230.
- Olsen, N.; Hulot, G. e Sabaka, T.J. (2010). **Measuring the Earth's Magnetic Field from Space: Concepts of Past, Present and Future Missions**. Space Sci. Rev. 155, 65-93.
- Orsted. (2012). **The Ørsted Satellite**. National Space Institute. Technical University of Denmark. Em <<http://www.space.dtu.dk/English/Research/Projects/Oersted.aspx>>. Acesso em 12/02/2012.
- Papi, F.; Luschi, P.; Akesson, S.; Capogrossi, S. e Hays, G.C. (2000). **Open-sea migration of magnetically disturbed sea turtles**. J. Exp. Biol. 203. 3435–3443.
- Pinheiro, K. (2012). **O Geodínamo. Curso: Magnetismo da Terra**. Observatório Nacional. Ministério da Ciência e Tecnologia. Curso On-line. Disponível em <www.on.br>.
- Quadro, M. e Fuentes, M. (2004). **A Atmosfera - MF03**. Publicação do Centro Federal de Educação Tecnológica de Santa Catarina. Gerencia Educacional de Formação Geral e Serviços, Curso Técnico de Meteorologia, Santa Catarina, Brasil.

- Sabaka, T.J.; Hulot, G. e Olsen, N. (2010). **Mathematical Properties Relevant to Geomagnetic Field Modeling**. In: Handbook of Geomathematics, Vol. 1 (Eds.: Freeden, W., Nashed, Z., Sonar, T.), 503-538. Springer, Heidelberg.
- Sale, A. e Luschi, P. (2009). **Navigational challenges in the oceanic migrations of leatherback sea turtles**. Proc. R. Soc. B 276, 3737–3745.
- Schroeder, B. e Murphy, S. (1999). **Population surveys (ground and aerial) on nesting beaches**. pp. 45-55. In: K. L. Eckert, K. A. Bjorndal, F. A. Abreu Grobois and M. Donnelly (eds), Research and Management Techniques for the Conservation of Sea Turtles. IUCN/SSC Marine Turtle Specialist Group Publication No. 4. Washington D.C. [http://www.iucn-mtsg.org/Publications/Tech_Manual/Tech_Manual_en/08_schroeder&murhpy.pdf].
- Seeber, G. (2003). **Satellite Geodesy**. 2° ed. Berlin-New York: Walter de Gruyter, 589p.
- Seminoff, J.A.; Zárata, P.; Coyne, M.; Foley, D.G.; Parker, D.; Lyon, B.N. e Dutton, P.H. (2008). **Post-nesting migrations of Galápagos green turtles (*Chelonia mydas*) in relation to oceanographic conditions: integrating satellite telemetry with remotely sensed ocean data**. Endangered Species Research 4, 57-72.
- Smith, J.A. (1992). **Precursors to Peregrinus: The early history of magnetism and the mariner's compass in Europe**. J. Medieval Hist., 18, 21–74.
- Space Weather-Canadá. (2012). **International Space Environment Service (ISES)**. Government of Canada. Disponível em <<http://www.spaceweather.gc.ca/index-eng.php>> acesso em 06/10/2012.
- Space Weather-NOAA. (2013). **Space Weather Prediction Center**. Live Monitoring. Disponível em <<http://www.swpc.noaa.gov/SWN/index.html>>. Acesso em 10/08/2013.
- Spotila, J. (2004). **Sea turtles: a complete guide to their biology, behavior, and conservation**. Baltimore, Maryland: The Johns Hopkins University Press. Baltimore & London, 240p.
- Stern, D. (2002). **A millennium of geomagnetism**. Rev. Geophys., 40(3), 1007, doi:10.1029/2000RG000097.
- Teixeira, W.; Toledo, M.C.M.; Fairchild, T.R. e Taioli, F. (Orgs.). (2009). **Decifrando a Terra**. São Paulo: Oficina de Textos, 568 p.
- Warwick, J.W. (1971). **The relation of angular momentum and magnetic fields: Schuster's hypothesis revisited**. Phys. Earth Planet. Inter., 4, 229–232.
- Verosub, K.L. e Roberts, A.P. (1995). **Environmental Magnetism: past, present and future**. Journal of Geophysical Research, v.100, p. 2175-2192.
- Vershuur, G.L. (1993). **Hidden Attraction: The History and Mystery of Magnetism**. Oxford Univ. Press, New York, 272p.

- Winterhalter, D.; Acuña, M.H. e Zakharov, A. (2011). **Mars' magnetism and its interaction with the solar wind**. Dordrecht , Norwell, MA : Kluwer Academic Publishers, 265p.
- VIMS (2013). **The Virginia Institute of Marine Science. Sea Turtle Stranding Program**. Virginia, USA, <http://www.vims.edu/research/units/programs/sea_turtle/index.php>. Acesso em 15/07/2013.
- WMM2010. (2012). **The US/UK World Magnetic Model for 2010-2015**. NOAA Technical Report. Disponível em <<http://www.ngdc.noaa.gov/geomag/WMM/DoDWMM.shtml>>. Acesso em 01/04/2012.
- Wyneken, J.A. (1997). **Sea turtle locomotion: mechanics, behavior and energetics**. In: Lutz, P. L.; Musick, J. (eds.). *The biology of sea turtles*, CRC Press, Boca Raton, FL, pp 165-197.
- Wyneken, J. (2001). **The Anatomy of Sea Turtles**. U.S. Department of Commerce NOAA Technical Memorandum NMFS-SEFSC-470, 1-172 pp.
- Wyneken, J.; Godfrey, M.H. e Bels, V. (2007). **Biology of Turtles: From Structures to Strategies of Life**. CRC Press. Taylor & Francis Group, USA, 406p.

APÊNDICE

GREEN TURTLES AND THE CRUST'S MAGNETIC FIELD

Guilherme P. da Silva and Tereza C. M. de Araújo
Laboratório de Geologia Marinha (LABOGEO)
Departamento de Oceanografia, Centro de Tecnologia e Geociências
Universidade Federal de Pernambuco (UFPE)
Cidade Universitária, 50670-901, Recife -PE, Brazil
Author for correspondence (guilherme.pereirasilva@ufpe.br)

SUMMARY

The migration of green turtles (*Chelonia mydas*) is a mystery in marine biology due to long distances these animals cover with great accuracy. A comparative study with the migratory patterns of green turtles and the earth's magnetic field was carried out. The newest geomagnetic models (WMM2010 and EMM2010) were used to determinate the intensities of crust's magnetic field throughout the turtle's migration routes. Intensity maps of the crust's magnetic field were overlapped over the turtle's tracks from different areas around the world. The results showed several magnetic anomalies nearby the turtle's routes. A comparative analysis indicated that these animals move preferentially through low variation regions of the crust's magnetic field. They don't seem to cross the strong variation regions of the magnetic field. The results suggest that the crust's magnetic anomalies can be used as a way to predict the most probable routes of green turtles migrations.

Key Words: green turtles, geomagnetism, migration, navigation.

According to the current geophysical model, the Earth's magnetic field is composed by the Main Magnetic Field (MMF), generated by the planet's outer core, the Crust's Magnetic Field (CMF), generated by the most external layer of the solid rocks, and the diurnal variations of the ionosphere (Matzner, 2001). MMF's levels vary from 22 000 to 60 000 nanoTesla (nT) in modular magnitude and global dimensions. CMF's levels vary from tens to hundreds nT in modular magnitude (Gubbins and Herrero-Bervera, 2007). In late 2009, updates of mathematical models were introduced, to describe the geomagnetic field. Updates of the World Magnetic Model (WMM) and the Enhanced Magnetic Model (EMM) were presented and incorporated a new technological advance to access the geomagnetic components (Butler, 2004). The new models collect experimental data obtained from several sources, including those generated

by magnetic sensors installed on satellites. In November 2009 the new WMM model elaborated by the National Geophysical Data Center (NGDC), National Oceanic and Atmospheric Agency (NOAA), British Geological survey (BGS) and North Atlantic Treaty Organization (NATO) was presented. This model evaluated the main Earth's magnetic field from 2010 to 2015, including the data already consolidated from 1900 to 2010 (WMM, 2010). In December 2009, the new model EMM produced by NOAA and NGDC was introduced. The EMM model determines the MMF's intensities and added to the CMF's intensities, these sums were called Enhanced Magnetic Field (EMF), and were applied to range of 50 km depth (EMM, 2010). These models (WMM2010 and EMM2010) are also applied to the oceanic provinces, and are a tool to marine geology and the study of oceanic environments.

Marine biologists have pointed the Earth's magnetic field as a possible parameter to the magnetic perceptions of animals like several species of turtles (Lohmann et al. 2008; Luschi et al., 2001), large pelagic fish (Willis et al., 2009) and crustaceans (Alerstam, 2003).

Green turtles (*Chelonia mydas*) are possibly capable to perceive local magnetic conditions during migration movements (Hazel, 2009; Lohmann, 2007). These animals were found in tropical and subtropical environments of the Atlantic, Pacific, and Indian Oceans (Plotkin, 2003). One of the migration areas of these species is Ascension Island, British territory of Saint Helen in the South Atlantic Ocean, where it has been followed by satellite telemetry (Hays et al., 2001). These animals travel an approximate distance of 2 300 km over the Atlantic Ocean, in regular migrations of 2 or 4 years (Luschi et al., 1998). Females always return to the beach where they were born (Lutz et al., 2003). Johnsen and Lohmann (2008) reported a kind of navigation to the species associated with a complex, and not completely explained mechanism. Hays et al. (2003) examined the wind influence over the migration of these turtles and pointed to an important factor. The tracks of these animals over the ocean have been accompanied in several parts of the world by a range of researchers using satellite. We will analyze some of those on the following session.

Luschi et al. (1998) and Papi et al. (2000) used the satellite telemetry by Argos system on migrations of green turtles from the Ascension Island to Brazil, tracking both total and adjacent movements (Argos System, 2008). With the same telemetry system Åkesson et al. (2003) analyzed a group of turtles nearby Ascension Island. Witt et al. (2010) described the precision of telemetry methods over oceanic's routes of green turtles from Brazil to Ascension Island. Cheng (2000) related the migratory routes of green turtles at Wan-An Island in Penghu Archipelago (Taiwan) during the summers 1994 and 1997 using satellite transmitters, Godley et al. (2003) relates the routes of green turtles from Guinea-Bissau to Mauritania attaching ten satellite transmitters to turtles in November 2001. Balazs and Ellis (2000) described the breeding of green turtles from French Frigate Shoals (Maui) to Kaneohe Bay (Oahu) in Hawaiian Is-

lands. Broderick et al. (2007) presented the movements of green turtles into Mediterranean Sea to 1998/2002. The movements of green turtles from Tortuguero (Costa Rica, Central America) were studied by Tröeng et al. (2005). Navigation of green turtles was tracked by satellite around Europe Island (Africa) by Girard et al. (2006). Seminoff et al. (2008), describes green turtle's movements in Galápagos Island integrating satellite telemetry with remotely sensed ocean data. The green turtles traveling from Ogasawara Islands (Japan) were monitored by Hatase et al. (2006).

Green turtles are usually monitored by telemetry and some parameters exist that are believed to possibly influence the ocean navigation, such as temperature, speed of oceans currents, salinity of water, feeding areas and the connection with predators, among others. In the present study we will investigate the variability of the CMF near the routes of the animals, searching for a consistent relationship. This work aims to identify possible connections between the tracks of the green turtles (*Chelonia mydas*) and the CMF's intensities at several oceanic areas of the world.

The method used includes determining the CMF's intensities (module of the vector Total Field of the Earth's Crust) on areas studied by several researchers, comparing the locations of the CMF's anomalies with the routes of green turtles (*Chelonia mydas*). This will be a work of mathematical calculation of the CMF and their geographical distribution, in the regions where turtle's movements were followed.

For mathematical calculation of the MMF the software WMM2010_grid.c (in language) was used. This software determine the intensities of the geomagnetic total field components and contains coefficients updated by BGS and NOAA from 2010 to 2015 (WMM, 2010), including the consolidated period from 1900 to 2010. The accuracy is 0.1 nT in MMF's intensities and 0.01 degrees in angular components (magnetic declination and magnetic inclination). All intensities were calculated to the mean sea level altitude (MSL), in a respective date and 0.1 of step degree. With the WMM2010 model, tables containing the geographic coordinates and the MMF's intensities were assembled. The

EMM2010 model has the same accuracy and coverage of the WMM2010 model and determines the Enhanced Magnetic Field (EMF) that correspond the MMF added to the CMF (EMM, 2010). The WMM2010 and EMM2010 models cover a range of 1 000 m below MSL until 850 km above. The software EMM2010_grid.c in C++ language produced by NOAA and NGDC was used in determining the EMF. With EMM2010 model were assembled EMF's tables according to each area studied.

The MMF's intensities were subtracted from the EMF's intensities and thus it was obtained values that represent the magnetic field intensities generated by the Earth's crust (CMF). All values were calculated in this work for altitudes of MSL. Due to the fact the obtained tables were very extensive (from 700 to 30 951 lines) they were presented as supplementary tables (numbered from S1 to S14). The magnetic models description and software used here are ready to use and can be accessed for researchers in NOAA-NGDC official sites as follows:

WMM2010 (<http://www.ngdc.noaa.gov/geomag/WMM/DoDWMM.shtml>)

EMM2010 (<http://ngdc.noaa.gov/geomag/EMM/emm.shtml>)

Using the Surfer 9 software (Surfer, 2009), grids of the CMF's intensities were assembled and the respective maps built with colored contours. The Kriging method on mathematical approach was used and contour lines were made by rainbow color type. Each map constructed reproduces the CMF's intensities for a demar-

ked oceanic region to a correspondent year and the color indicates the magnetic intensities.

Several descriptive maps of the green turtles migration's routes were used and their tracks by satellite telemetry detached. It was maps used included in works according to Luschi et al. (1998), Åkesson et al. (2003), Witt et al. (2010), Cheng (2000), Godley et al. (2003), Balazs and Ellis (2000), Broderick et al. (2007), Tröeng et al. (2005), Girard et al. (2006), Seminoff et al. (2008) and Hatase et al. (2006). The geographical limits of each researcher's area studied are listed in the Table I, covering diverse world's zones in different oceans.

Following the track's maps were overlapped (produced by each researcher cited) to the respective maps of CMF. A comparative evaluation over the positions of the animal's tracks and the crust's magnetic field intensities were then prepared.

Applying the WMM2010 and EMM2010 models, the intensities of the Earth's magnetic field were obtained from the turtle's migration area in Luschi et al. (1998). With calculations of the MMF's intensities, a table was generated with 3 280 lines (Table S1). This table was transposed to a grid and the geographic distribution as shown in Fig. 1A. With calculations of the EMF's intensities a table was generated with 3 280 lines (Table S2). This table was transposed to a grid and the geographical distribution presented in Fig. 1B. Subtracting the MMF's values from the EMF's, a table with 3 280 lines of the CMF's intensities at MSL was produced (Table S3). The respective grid was constructed and the map of the CMF's intensities is presented in

Table I. Identification of the researchers with the respective publication dates included, date of data collection, locations and their limits of geographical coordinates (latitudes and longitudes in degrees).

Researcher	Date	Location	Latitude limits	Longitude limits
Luschi et al. (1998)	(1997)	Ascension Island (Atlantic Ocean)	6°S - 10°S	12°W - 20°W
Åkesson et al. (2003)	(2000)	Ascension Island (Atlantic Ocean)	6.5°S - 8.5°S	14°W - 17.5°W
Witt et al. (2010)	(2002)	Open South Atlantic Ocean	9.22°S - 11.66°S	32.14°W - 34.87°W
Cheng (2000)	(1996)	Taiwan (China Sea)	21.25°N - 27.5°N	119°E - 128.5°E
Godley et al. (2003)	(2001)	Guinea-Bissau (Africa)	9°N - 23°N	12°W - 20°W
Balazs and Ellis (2000)	(1995)	Hawaiian Islands (Pacific Ocean)	18.5°N - 24.24°N	154.5°W - 166.5°W
Broderick et al. (2007)	(2002)	Cyprus to Libya (Mediterranean)	30°N - 38°N	7.5°E - 38°E
Tröeng et al. (2005)	(2002)	Tortugero (Caribbean Sea)	9.6°S - 16.1°S	79.8°W - 87.4°W
Girard et al. (2006)	(2003)	Mozambique Channel (Africa)	22°S - 25°S	37°E - 43°E
Seminoff et al. (2008)	(2005)	Galápagos (Pacific Ocean)	2°S - 15°N	77°W - 95°W
Hatase et al. (2006)	(1998)	Ogasawara Islands (North Pacific)	25.7°N - 35.6°N	129.4°E - 144.3°E

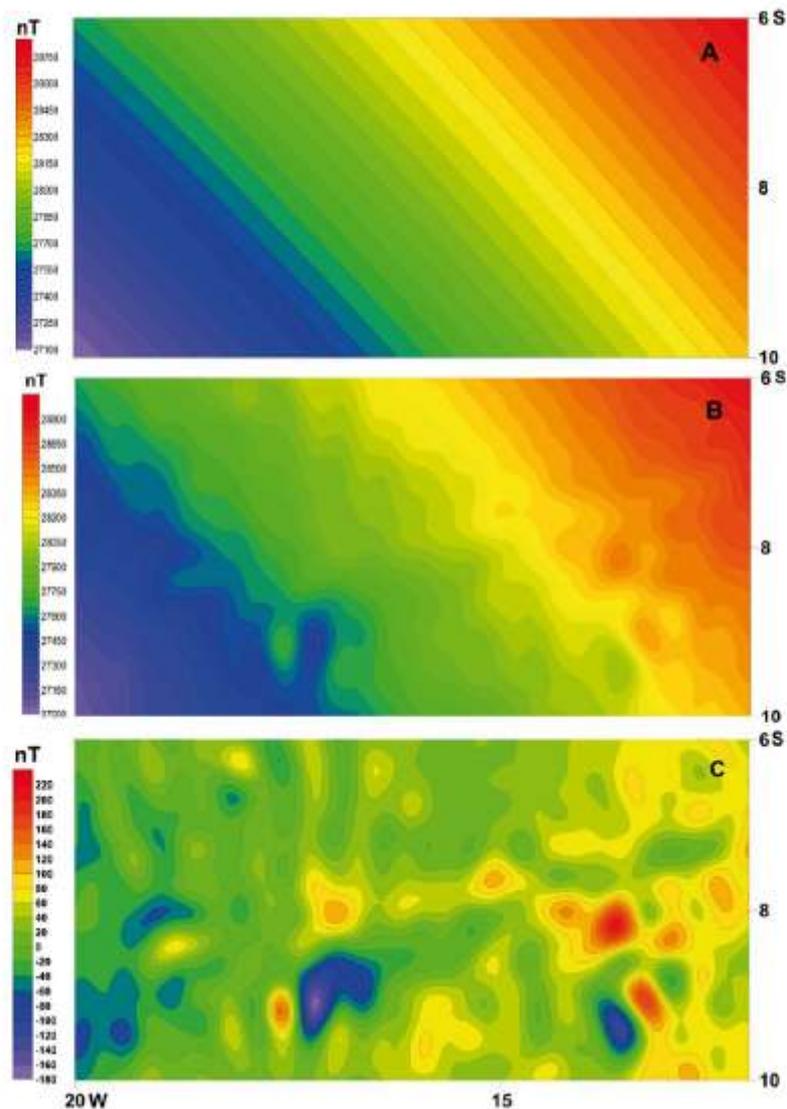


Figure 1. Charts of the MMF's intensities (A), EMF's (B) and CMF's (C) at MSL. The region refers to initial 148 migration of green turtles (*Chelonia mydas*) by Luschi et al. (1998) nearby the Ascension Island. The charts were 149 constructed on equatorial Mercator's projections and the color scale indicates magnetic field's intensities.

Fig.1C, which shows regions without non-regular variations (CMF's magnetic anomalies).

Fig.2 was produced overlapping the migratory tracks by Luschi *et al.* (1998) over Fig.1C, representing a contrast between turtle's tracks and the CMF's intensities to this oceanic area at MSL.

Using the same methodology a map of the CMF's intensities, described by Åkesson et al. (2003), a table was built with 735 lines, nearby the Ascension Island (Table S4). Fig.3 shows

the superimposition of turtle's tracks over the respective map of the CMF's intensities.

With this methodology a map of CMF's intensities, of the area described by Witt et al. (2010), was built tracking a green turtle from Brazil to the Ascension Island over the ocean, using a calculated table with 700 lines (Table S5). Fig.4 shows the superimposition of turtle's tracks over the map of CMF's intensities.

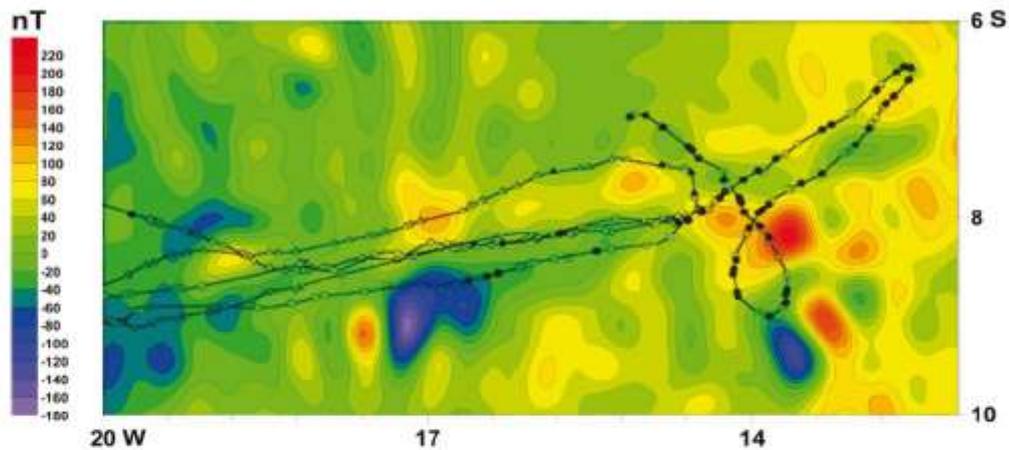


Figure 2. Tracks of migrating green turtles (*Chelonia mydas*) by Luschi et al. (1998) overlapped to the CMF's 156 intensities map. The color scale indicates the CMF's intensities at MSL. The chart was constructed on equatorial 157 Mercator's projection.

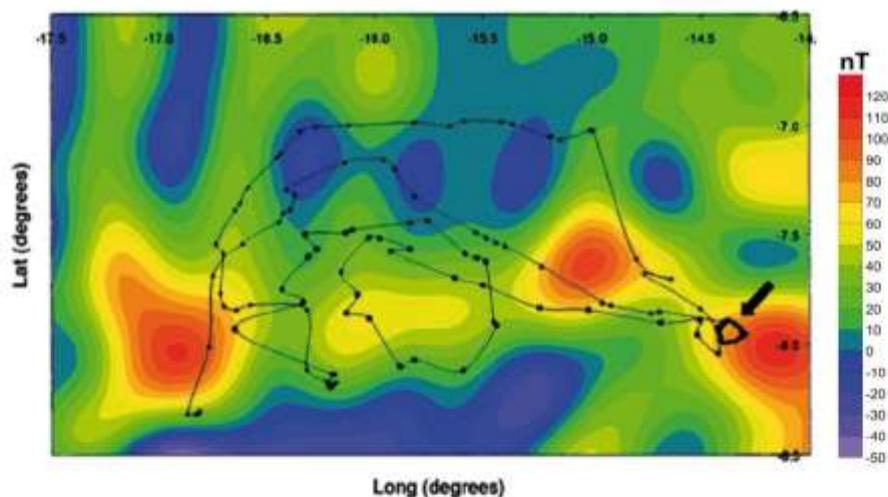


Figure 3. Green turtle's (*Chelonia mydas*) tracks by Åkesson et al. (2003) nearby the Ascension Island (indicated by 165 black arrow) superimposed to the CMF's intensities. The color scale indicates the CMF's intensities at MSL.

With this procedure, a table with 6.048 lines was generated (Table S6) and a map of the CMF's intensities on the area analyzed by Cheng (2000), relative to the China Sea from Taiwan to Okinawa, was constructed. From the overlap of the turtle's tracks over the CMF's intensities, Fig.5 was obtained.

A table with 16.800 lines was generated (Table S7) and a map of the CMF's intensities to the movements of green turtles from Guinea-Bissau

to Mauritania (Africa) by Godley et al. (2003) was constructed. The authors used reversed longitudes ($360^\circ - \lambda$). Using the overlap from these maps (turtle's tracks in red) to the CMF's intensities, Fig.6 was obtained.

Applying this procedure to the area by Balazs and Ellis (2000), from the French Frigate Shoals to Molokai (Maui) and Oahu in the Hawaiian Islands, a table with 7 018 lines was generated (Table S8) and a map of the CMF's intensities cons-

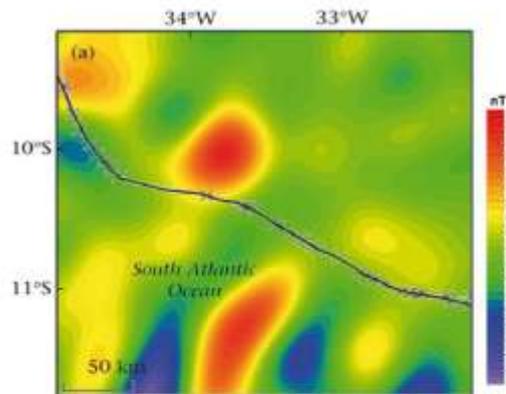


Figure 4. Open ocean's track of a green turtle (*Chelonia mydas*) migrating from Brazil to the Ascension Island by Witt et al. (2010) overlapped to the CMF's intensities. The color scale indicates the CMF's intensities at MSL.

tracted. Using the overlap of these tracks over the CMF's intensities, Fig.7 was obtained.

Relative to migratory green turtle's tracks by Broderick et al. (2007), a table with 1 054 lines was generated (Table S9) and a map of the CMF's intensities for the Mediterranean Sea (between Cyprus and Libya) was constructed. Using the overlap of this track over the CMF's intensities, Fig.8 was obtained.

In movements of a green turtle to the Caribbean Sea by Tröeng et al. (2005), a table with 5082 lines (Table S10) was generated and the CMF's intensities map constructed. Using the overlap of the turtle's track over the CMF's intensities maps, Fig.9 was obtained.

In movements of green turtles around Europa Island (Africa) by Girard et al. (2006) table A was generated with 1 800 lines (Table S11) and

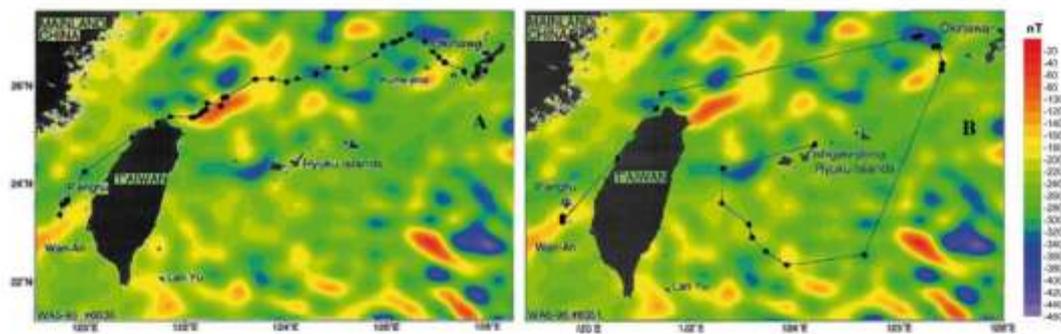


Fig. 5. Migration of two green turtles (A and B) at China Sea by Cheng (2000) overlapped to map of the CMF's 181 intensities. The color scale indicates the CMF's intensities at MSL.

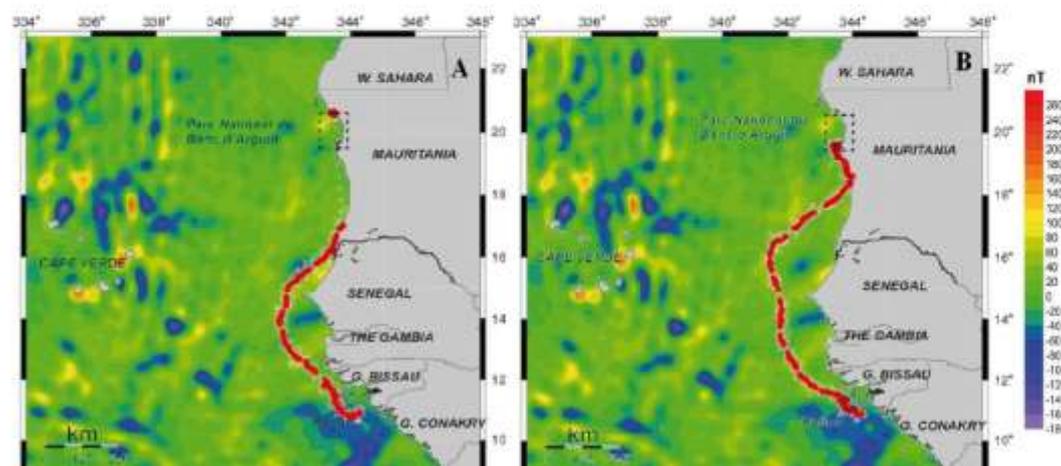


Fig. 6. Migrations of two (A and B) green turtles from Guinea-Bissau to Mauritania (Africa) by Godley et al. 190 (2003) overlapped to map of the CMF's intensities. The color scale indicates the CMF's intensities at MSL.

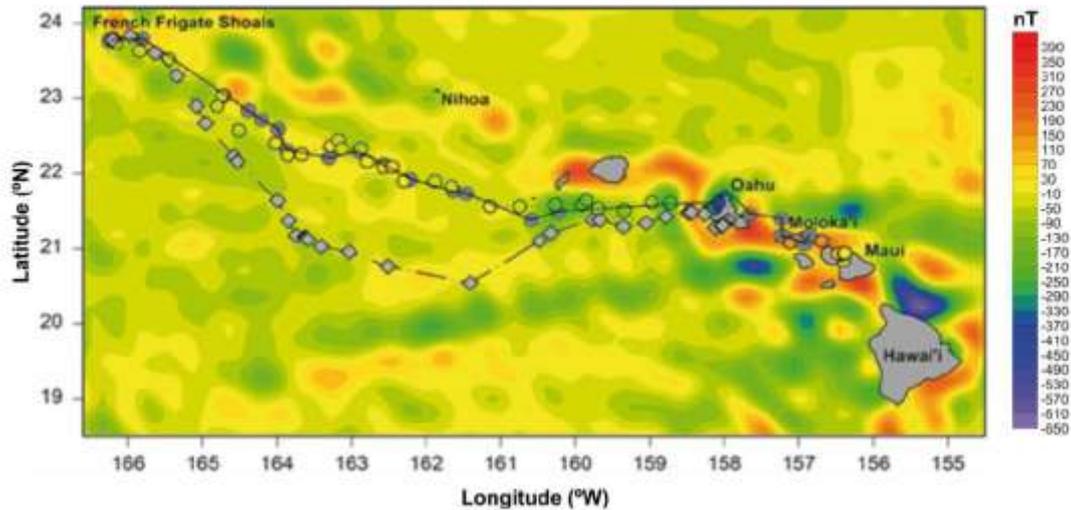


Fig. 7. Migration of green turtles from French Frigate Shoals to Kaneohe Bay in the Main Hawaiian Islands by 198 Balazs and Ellis (2000), overlapped to map of the CMF's intensities. The color scale indicates the CMF's 199 intensities at MSL.

table B with 2 400 lines (Table S12), thus the CMF's intensities map to each case was constructed. Using the overlap of the turtle's tracks over the CMF's intensities maps, Fig.10 was obtained.

Seminoff et al. (2008) registered tracks of green turtles from Galápagos Islands to Central America producing several route's maps. Data of the type A1 turtles (designation by cited authors) generated a table with 30 951 lines (Table S13) relative to the CMF's intensities and the respective map constructed. Using the overlap of the turtle's tracks over the CMF's intensities maps, Fig.11 was obtained.

Relative to the movements of green turtles from Ogasawara Islands (Japan) by Hatase et al. (2006), a table with 14 850 lines (Table S14) was

generated and the CMF's intensities map constructed. From the overlap of the turtle's tracks to the CMF's intensities map, Fig.12 was obtained.

71 main centers of the CMF's anomalies identified and located near the turtle tracks and their geographical locations (latitudes and longitudes) are shown in Table 2.

With the results of the comparison between CMF's intensities and green turtle tracks (seen in Figs. 2 thru 12), conducted by diverse researchers in several areas, from around the world and under different oceanic environments, it was observed a common behavior to the analyzed components (earth's magnetism and geographic movements). It is assumed that the presence of these magnetic anomalies can be understood

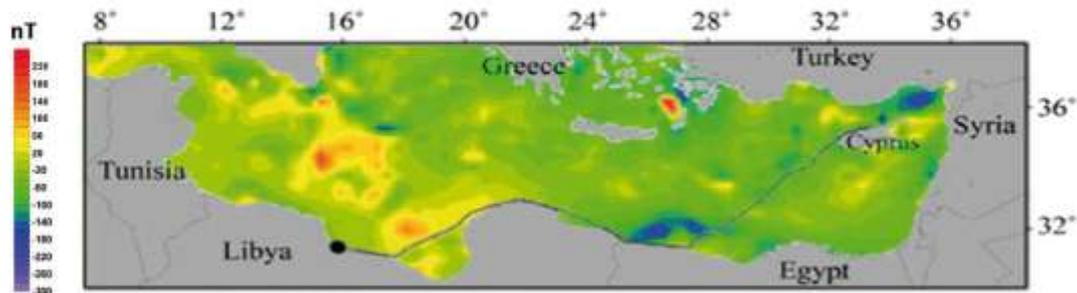


Fig. 8. Migration of a green turtle (*Chelonia mydas*) in Mediterranean Sea by Broderick et al. (2007) overlapped 207 to map of the CMF's intensities. The color scale indicates the CMF's intensities at MSL.

as an important component to the 14 animal navigation system, although not completely comprehended yet. To test this hypothesis diverse analysis about the variability of the components involved were needed in addition to specific data to each region. It was observed that the CMF's anomalies represent relative variations and was not absolute, so the intensities have a local importance to each case. Noting the various regions were studied separately and with their respective variability, everyone's case is stated as follows

Looking at the Fig. 2, eight main magnetic anomalies are identified in the vicinity of the Ascension Island investigated by Luschi et al. (1998). It is observed that the movements of the turtles are always out off the center of the magnetic anomalies (numbered from 01 to 08 in Table 2). An exception seems to occur at anomaly

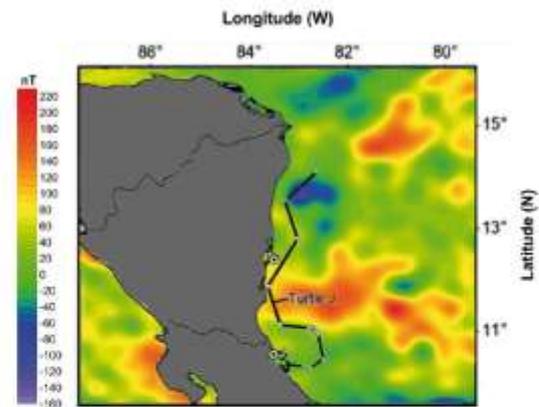


Figure 9. Track of a green turtle between Costa Rica and Nicaragua (Central America) by Trøeng et al. (2005) 214 overlapped over map of the CMF's intensities. The color scale indicates the CMF's intensities at MSL.

Table II. Identification of main centers of the CMF's anomalies by numbers (Nr.) nearby the green turtle's tracks for all researchers cited. The CMF's intensities (nT unity) are relative to center of the anomalies and their respective coordinates (latitude and longitude) are included.

Researcher and area	Nr.	Latitude (°)	Longitude (°)	CMF Intensity (nT)	Researcher and area	Nr.	Latitude (°)	Longitude (°)	CMF Intensity (nT)	
Luschi et al. (1998) Ascension Island Atlantic Ocean	(01)	8.1 S	13.7 W	201.9	Broderick et al. (2007) Mediterranean Sea	(36)	52.1 N	26.0 E	-170.1	
	(02)	9.0 S	13.3 W	179.1		(37)	32.0 N	18.1 E	127.0	
	(03)	9.4 S	13.6 W	-121.7		(38)	34.0 N	30.0 E	-125.2	
	(04)	9.1 S	17.2 W	-176.2		(39)	36.0 N	34.5 E	-178.9	
	Akerson et al. (2003) Ascension Island Atlantic Ocean	(05)	7.6 S	13.1 W	112.6	Trøeng et al. (2005) Costa Rica Atlantic Ocean	(40)	13.6 N	83.2 W	-99.5
		(06)	8.0 S	16.9 W	113.6		(41)	11.7 N	81.1 W	167.8
		(07)	9.1 S	17.6 W	138.9		(42)	11.5 N	82.6 W	174.5
		(08)	8.0 S	14.2 W	126.8		(43)	13.0 N	82.7 W	-47.7
Witz et al. (2010) Atlantic Ocean		(09)	8.0 S	14.2 W	119.0	Girard et al. (2006) Europa Island Africa Map A	(44)	23.4 S	38.1 E	-114.2
		(10)	7.6 S	15.1 W	106.2		(45)	23.9 S	37.5 E	267.2
		(11)	8.2 S	15.4 W	-26.8		(46)	24.2 S	39.4 E	-110.1
		(12)	8.0 S	16.9 W	110.7		(47)	23.7 S	40.2 E	122.2
	(13)	7.1 S	16.3 W	-11.9	(48)		24.3 S	42.1 E	179.5	
	(14)	8.3 S	15.4 W	-28.2	(49)		23.6 S	42.4 E	172.5	
Cheng (2006) Taiwan China Sea	(15)	9.6 S	34.7 W	134.1	Girard et al. (2006) Europa Island Africa Map B	(50)	23.4 S	38.1 E	-114.2	
	(16)	10.0 S	34.7 W	-195.4		(51)	23.8 S	37.6 E	233.7	
	(17)	10.0 S	33.8 W	299.7		(52)	24.2 S	39.4 E	-110.1	
	(18)	11.2 S	33.7 W	257.8		(53)	22.2 S	40.3 E	123.4	
	(19)	11.4 S	33.5 W	-237.5		(54)	21.6 S	39.2 E	-90.9	
	Godley et al. (2003) Guinea-Bissau to Mauritania Africa	(20)	25.5 N	122.7 E		-65.7	Seminoff et al. (2008) Galapagos Pacific Ocean Type A1	(55)	0.8 N	89.0 W
(21)		26.0 N	122.8 E	-366.2	(56)	1.4 N		88.6 W	492.8	
(22)		26.1 N	124.6 E	-335.8	(57)	1.8 N		88.5 W	341.0	
(23)		27.0 N	125.4 E	-116.5	(58)	1.8 N		88.8 W	-243.3	
(24)		26.0 N	126.8 E	-116.3	(59)	4.5 N		87.7 W	-313.4	
(25)		24.2 N	123.3 E	-356.4	(60)	4.1 N		87.5 W	246.8	
Balazs and Ellis (2000) Hawaiian Islands Pacific Ocean	(26)	25.7 N	122.1 E	-336.1	Hatake et al. (2006) Japan Pacific Ocean	(66)	30.1 N	134.3 E	89.4	
	(27)	14.6 N	17.6 E	-53.1		(67)	29.3 N	134.3 E	-319.1	
	(28)	14.4 N	16.7 E	116.0		(68)	26.9 N	139.6 E	149.8	
	(29)	13.2 N	17.2 E	-49.4		(69)	26.7 N	141.3 E	-290.7	
	(30)	9.7 N	15.5 E	-86.9		(70)	28.9 N	140.9 E	115.0	
	(31)	24.1 N	166.2 W	84.6		(71)	31.3 N	140.5 E	202.5	
(32)	23.1 N	164.5 W	150.4							
(33)	22.0 N	159.9 W	328.4							
(34)	22.0 N	158.4 W	216.7							
(35)	21.2 N	157.6 W	352.1							

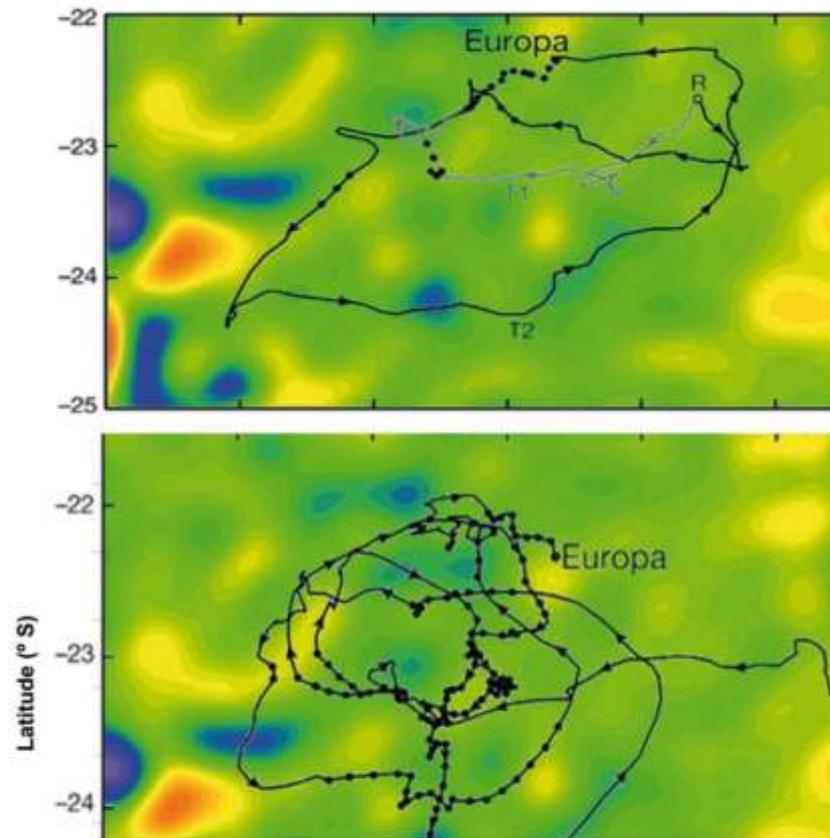


Figure 10. Green turtle' tracks (A and B) nearby the Europa Island (Mozambique Channel, Africa) by Girard et al. 222 (2006) overlapped to the maps of the CMF's intensities. The color scale indicates the CMF's intensities at MSL.

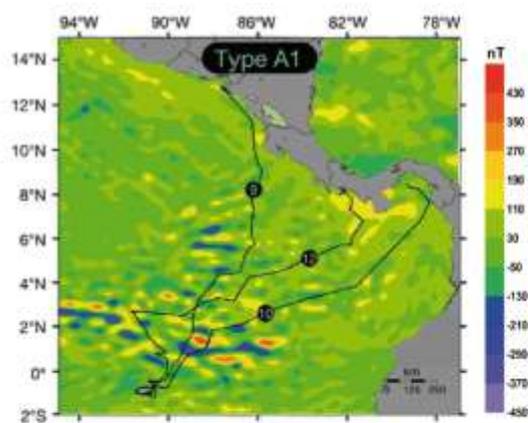


Figure 11. Tracks of green turtles from Central America to Galápagos Islands (Type A1) by Seminoff et al. (2008) 231 overlapped to map of the CMF's intensities. The color scale indicates the intensities of the CMF at MSL.

number 06 but observing carefully the animal's tracks, it does not cross the geographical center of that anomaly. It is possible that the imprecision of the geomagnetic model used (around 1 minute of arc over the ocean) could be responsible for this uncertainty.

Fig. 3 shows 06 main magnetic anomalies (09 to 14 in Table II) around the Ascension Island described by Åkesson et al. (2003). Trajectories are at external boundary of all centers of these anomalies described. The tracks were laid in areas where little change in the CMF's intensity exists.

Analyzing Fig. 4, open ocean turtle's migration from the coast of Brazil and Ascension Island by Witt et al. (2010), are identified 05 main anomalies (from 05 to 19 in Table II). It is observed that the way of the animal does not transpose any center of anomalies indicated, but

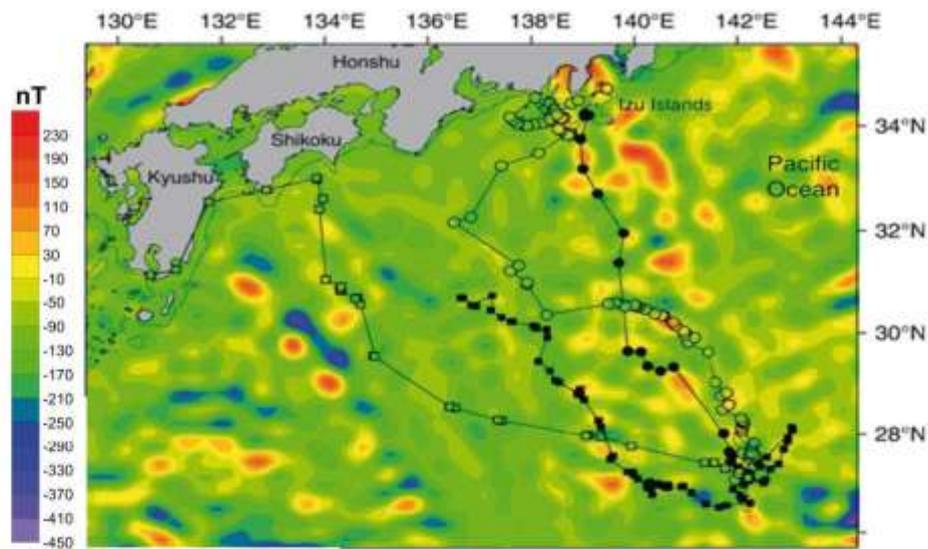


Figure 12. Post-nesting routes with four green turtles tracked by satellite from Ogasawara Islands (Japan) by Hatase 239 et al. (2006), overlapped to map of the CMF's intensities. The color scale indicates the CMF's intensities at 240 MSL

crosses areas where the CMF's intensities have a regular variation.

Over the China Sea area by Cheng (2000), are identified 07 main anomalies (20 to 26 in Table 2) close to the path traveled by migrants turtles, which are shown in Figure 5 (A and B). It was observed that the anomalies 20, 23, 24 and 25 weren't transposed by turtle's tracks, while the anomalies 21 and 22 had strong approximation, inaccuracy may come from the large scales used. At anomaly 21 there is a large distance between two points of position's measurements which makes its location imprecise to this part of the route.

Analyzing the area of turtle's movements described by Godley et al. (2003) from Guinea-Bissau to Mauritania (Africa) are identified 04 main centers of anomalies (27 to 30 in Table 2). In all these anomalies the green turtle's tracks do not overcome the centers of major variations of CMF (maps A and B at Fig. 6), traversing only areas of low magnetic variation.

In migration's area examined by Balazs and Ellis (2000) in Hawaiian Islands (Fig. 7) were 05 main anomalies (31 to 35 in Table 2) nearest to the route described by the turtles. The anomaly 31 (north of French Frigate Shoals) is

a limit for all animals, both male (represented by trapezoids) and females (represented by circles). The tracks do not cross over the CMF's anomalies.

In the movement studied by Broderick et al. (2007) to the Mediterranean Sea were 04 main magnetic anomalies (36 to 39 in Table 2) near the tracks. None of them have transposition over anomaly's centers as seen in Fig. 8.

In the Caribbean Sea examined by Tröeng et al. (2005), shown in the Fig. 9, the turtle's track monitored pass around the anomalies (40 to 43 in Table 2) and any transposition of the center of these anomalies occurs.

In the movements studied by Girard et al. (2006) around the Europa Island in Africa (Fig. 10), were 06 main anomalies on map A and 05 main anomalies on map B (44 to 54 in Table 2). In most cases the routes were outside the anomalies. Two exceptions can be seen on Map B (anomalies 50 and 52) where the animals circulate to areas very close to the center of anomalies (but not crossing). These exceptions might be due to the model used.

On the map generated by Seminoff et al. (2008) in movements between Central America

and the Galapagos Islands (Fig. 11), were 06 main magnetic anomalies for type A1. In all of the observed anomalies (55 to 65 in Table 2) the animals move around the center of the strongest variations. Interestingly, two specimens apparently cross anomaly 55, but a closer look shows no crossing of the geographic center of the anomaly.

In the movements of turtles described by Hatai et al. (2006) to the Pacific Ocean near the Japanese Islands (Fig. 12) were 06 main anomalies (66 to 71 in Table 2). A greater number of anomalies were observed in this case, but they behave bordering the trajectories followed by 04 specimens of turtles, in some cases the model doesn't have sufficient spatial resolution for a better and accurate determination.

Even with many examples that point to a direct influence of CMF over the trajectories of migrating green turtles, we can't conclusively affirm that this occurs. We should note other factors before establishing a direct relation of these two parameters. For example: the magnetic field generated by the earth's crust has much lower intensity (order of tens or hundreds nT) compared with the main magnetic field (order of thousands nT), so it seems unlikely that the intensity of this field directly influences the behavior of aquatic animals. Thus we can't eliminate the possibility that CMF reflect indirectly another geophysical condition, generated by the oceanic crust that is capable to make animals in tracks most likely.

Among these indirect influences we can highlight the speed's variations of ocean currents due to the physiographic specific structures of the sea floor, the pressure's variations on the various water bodies caused by oceanic geological structures and the possibility of an internal mechanism in these species to detect soft variations of the magnetic field. We also should not rule out the possibility of the existence of gravimetric variations that indirectly appear as geomagnetic changes. Although the main cause would be from diverse origins, it is possible that we can identify their effects in the geomagnetic field.

Thus we wouldn't expect a direct relationship between the weak magnetic field of the crust, which is at thousands meters deep, and the routes

of animals that navigate in a range only a few hundred meters deep from MSL in their migrations. On the other hand this study found something different; there is a fairly common pattern of the migration of turtles to the areas analyzed. It was evaluated that these animals are most likely to navigate through areas where there are regular variations of the CMF. Their movements seem to suffer abrupt changes nearby areas with non-regular variations (generated by magnetic anomalies of the crust). Even making a visual assessment of the routes of these animals and the intensity of the geomagnetic field, this analysis has fundamental mathematical data here presented in supplementary tables (S1 to S14).

The MMF has a very regular behavior around the Earth, big magnetic anomalies only exists at the planet's poles and at southern Atlantic Ocean (South Atlantic Magnetic Anomaly -SAMA). The CMF has variations much more specific (although less in intensity) because of its variable geological evolution. We can't confirm with absolute certainty that the green turtles make strong deviations in their ways as a direct result of the CMF's anomalies, because the CMF's intensities are very low. But it is an acceptable supposition that a biological mechanism detects only soft changes of the vector magnetic field. It is strongly recommended that in future research on telemetry of the green turtles (*Chelonia mydas*) marine magnetometers would be used to map the intensity of the CMF to the areas of study. The hypothesis that the crust's magnetic field interferes on the navigation mechanisms of the green turtles, as hinted by the present study, could not be confirmed or denied by experimental studies associating biological data, telemetry by satellite and the earth's magnetic field jointly, all these data monitoring in real time.

REFERENCES

- ÅKESSON S., BRODERICK, A. C., GLEN, F., GODLEY, B. J., LUSH, P., PAPI, F. & HAYS, G. C. (2003) Navigation by green turtles: which strategy do displaced adults use to find Ascension Island? *Oikos* 103, 363-372.
- ALERSTAM, T. (2003). *Animal Behavior: The lobster navigators*. *Nature* 421, 27-28.

- ARGOS SYSTEM. (2008). Argos User's Manual: Worldwide tracking and environmental monitoring by satellite, CLS. Available at <http://www.argos-system.org>, accessed in April 15/2010.
- BALAZS, G. H. & ELLIS, D. M. (2000). Satellite telemetry of migrant male and female green turtles breeding in the Hawaiian Islands. In: Abreu-Grobois, F.A., Briseno-Duenas, R., Márquez-Millan, R., and Sarti-Martinez, L. (Compilers), Proceedings of the Eighteenth International Sea Turtle Symposium. NOAA Technical Memorandum NMFS-SEFSC 436, 281-283.
- BUTLER, R. F. (2004). Paleomagnetism: Magnetic Domains to Geologic Terranes. Electronic Edition. Department of Chemistry and Physics, 238p. University of Portland, Portland, Oregon, USA.
- BRODERICK, C. A., COYNE, M. S., FULLER, W. J., GLEN, F. & GODLEY, B. J. (2007). Fidelity and over-wintering of sea turtles. Proc. R. Soc. B 274, 1533-1539.
- CHENG, I. J. (2000). Post-nesting migrations of green turtles (*Chelonia mydas*) at Wan-An Island, Penghu Archipelago, Taiwan. Mar. Biol. 137, 747-754.
- EMM. (2010). Enhanced Magnetic Model. National Oceanic and Atmospheric Administration (NOAA) and National Geophysical data Center (NGDC). National Geophysical Data Center, EGC/2, 325 Broadway, Boulder, CO 80303, USA. Available for science researchers at <<http://www.ngdc.noaa.gov/geomag/EMM/emm.shtml>>, accessed Feb. 15/2010.
- GIRARD C., SUDRE J., BENHAMOU S., ROOS, D. & LUSCHI P. (2006). Homing in green turtles *Chelonia mydas*: oceanic currents act as a constraint rather than as an information source. Mar. Ecol. Prog. Ser. 322, 281-289.
- GUBBINS, D. AND HERRERO-BERVERA, E. (2007). Encyclopedia of Geomagnetism and Paleomagnetism. 1080p. Ed. Springer-Verlag, New York, USA.
- GODLEY B. J., ALMEIDA A., BARBOSA C., BRODERICK A. C., CATRY P. X., HAYS G. C. & INDJAI B. (2003) Using satellite telemetry to determine post-nesting migratory corridors and foraging grounds of green turtles nesting at Poilao, Guinea Bissau. Report to project donors. Unpublished Report, Marine Turtle Research Group, School of Biological Sciences, University of Wales Swansea, Swansea SA2 8PP, UK.
- HATASE, H., SATO, K., YAMAGUCHI, M., TAKAHASHI, K. & TSUKAMOTO, K. (2006). Individual variation in feeding habitat use by adult female green sea turtles (*Chelonia mydas*): are they obligately neritic herbivores? Oecologia 149, 52-64.
- HAYS, G. C., BRODERICK, A. C., GLEN, F., GODLEY, B. J. & NICHOLS, W. J. (2001). The Movement and Submergence Behaviour of Male Green Turtles at Ascension Island. Marine Biology 139, 395-399.
- HAYS, C. G., AKESSON, S., BRODERICK, A. C., GLEN, F., GODLEY, B. J., PAPI, F. & LUSCHI, P. (2003). Island-finding ability of marine turtles. Proc. R. Soc. Lond. B, 270, Suppl 1, S5-S7.
- HAZEL, J. (2009). Evaluation of fast-acquisition GPS in stationary tests and fine-scale tracking of green turtles. J. Exp. Mar. Biol. Ecol. 374, 58-68.
- JOHNSON, S. AND LOHMANN, K. J. (2008). Magnetoreception in Animals. Physics Today, 61 (3), 29-35.
- LOHMANN, K. J. (2007). Sea Turtles: Navigating with Magnetism. Current Biology 17, N. 3, R104.
- LOHMANN, K. J., LOHMANN, C. M. F. & ENDRES, C. S. (2008). The sensory ecology of ocean navigation. The Journal of Experimental Biology 211, 1719-1728.
- LUSCHI, P., HAYS, G. C., DEL SEPPIA, C., MARSH, R. & PAPI, F. (1998). The navigational feats of green sea turtles migrating

- from Ascension Island investigated by satellite telemetry. *Proceedings of The Royal Society Biology* 265, 2279-2284.
- LUSCHI, P., ÅKESSON, S., BRODERICK, A. C., GLEN, F., GODLEY, B. J., PAPI, F. & HAYS, G. C. (2001). Testing the navigational abilities of ocean migrants: displacement experiments on green sea turtles (*Chelonia mydas*). *Behav. Ecol. Sociobiol.* 50, 528-534.
- LUTZ, P. L., MUSICK, J. A. & WYNEKEN, J. (2003). *The Biology of Sea Turtles -Vol II*. CRC Press, Marine Science Series, 472p. New York, USA.
- MATZNER, R. A. (2001). *Dictionary of Geophysics, Astrophysics and Astronomy*. Ed. CRC Press, 526p, USA.
- PAPI, F., LUSCHI, P., ÅKESSON, S., CAPOGROSSI, S. & HAYS, G. C. (2000). Open-sea migration of magnetically disturbed sea turtles. *The Journal of Experimental Biology* 203, 3435-3443.
- PLOTKIN, P. (2003). Adult Migrations and Habitat Use. In *The Biology of Sea Turtles, Vol. II* (ed. P. L. Lutz and J. A. Musick), Cap. 8, p.231. Ed. CRC Press, USA.
- SEMINOFF, J. A., ZÁRATE P., COYNE M., FOLEY D. G., PARKER D., LYON B. N. & DUTTON, P. H. (2008). Post-nesting migrations of Galápagos green turtles (*Chelonia mydas*) in relation to oceanographic conditions: integrating satellite telemetry with remotely sensed ocean data. *Endangered Species Research* 4, 57-72.
- SURFER 9. (2009). Surface mapping system manual. Golden Software. Version 9. Golden, Colorado. Available at <www.golden-software.com>, accessed in May 12/2010.
- TROËNG, S., EVANS, D. R., HARRISON, E. & LAGUEUX, C. J. (2005). Migration of green turtles (*Chelonia mydas*) from Tortuguero, Costa Rica. *Marine Biology* 148, 435-447.
- WILLIS, J., PHILLIPS, J., MUHEIM, R., RASILLA, F. J. D. & HOBDAV, A. J. (2009). Spike dives of juvenile southern bluefin tuna (*Thunnus maccoyii*): a navigational role?. *Behavioural Ecology and Sociobiology* 64, 57-68.
- WITT, M. J., ÅKESSON, S., BRODERICK, A. C., COYNE, M. S., ELLICK, J., FORMIA, A., HAYS, G. C., LUSCHI, P., STROUD, S. & GODLEY B. J. (2010). Assessing accuracy and utility of satellite-tracking data using Argos-linked Fastloc-GPS. *Animal Behaviour* 80, 571-581.
- WMM. (2010). World Magnetic Model. The US/UK World Magnetic Model for 2010/2015. British Geological Survey, Technical Report, Macmillan S, Quinn J. <<http://www.ngdc.noaa.gov/geomag/WMM/>>, accessed in April 01/2010.