



COPPE/UFRJ

**CARACTERIZAÇÃO GEOMAGNÉTICA DO GRÁBEN PURUS E SUAS IMPLICAÇÕES
NA EVOLUÇÃO DAS BACIAS DO SOLIMÕES E DO AMAZONAS**

Marcos de Barros Munis

Tese de Doutorado apresentada ao Programa de Pós-graduação em Engenharia Civil, COPPE, da Universidade Federal do Rio de Janeiro, como parte dos requisitos necessários à obtenção do título de Doutor em Engenharia Civil.

Orientadores: Luiz Landau

Álvaro Luiz Gayoso de Azeredo
Coutinho

Rio de Janeiro
Dezembro de 2009

CARACTERIZAÇÃO GEOMAGNÉTICA DO GRÁBEN PURUS E SUAS IMPLICAÇÕES
NA EVOLUÇÃO DAS BACIAS DO SOLIMÕES E DO AMAZONAS

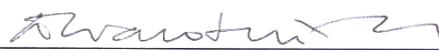
Marcos de Barros Munis

TESE SUBMETIDA AO CORPO DOCENTE DO INSTITUTO ALBERTO LUIZ COIMBRA DE
PÓS-GRADUAÇÃO E PESQUISA DE ENGENHARIA (COPPE) DA UNIVERSIDADE FEDERAL
DO RIO DE JANEIRO COMO PARTE DOS REQUISITOS NECESSÁRIOS PARA A OBTENÇÃO
DO GRAU DE DOUTOR EM CIÊNCIAS EM ENGENHARIA CIVIL.

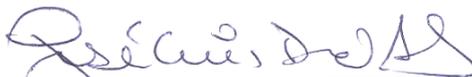
Examinada por:



Prof. Luiz Landau, D. Sc.



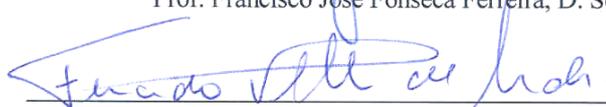
Prof. Álvaro Luiz Gayoso de Azeredo Coutinho, D. Sc.



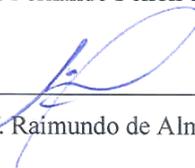
Prof. José Luís Drummond Alves, D. Sc.



Prof. Francisco José Fonseca Ferreira, D. Sc.



Prof. Fernando Pellon de Miranda, Ph. D.



Prof. Raimundo de Almeida Filho, D. Sc.

RIO DE JANEIRO, RJ – BRASIL

DEZEMBRO DE 2009

Munis, Marcos de Barros

Caracterização Geomagnética do Gráben Purus e suas implicações na evolução das bacias do Solimões e do Amazonas. /

Marcos de Barros Munis.- Rio de Janeiro: UFRJ/COPPE, 2009.

XII, 102 p.: il.; 29,7 cm.

Orientadores: Luiz Landau

Álvaro Luiz Gayoso de Azeredo Coutinho

Tese (doutorado) – UFRJ / COPPE/ Programa de Engenharia Civil, 2009.

Referências Bibliográficas: p. 92 – 102.

1. Métodos Potenciais, 2. Deconvolução de Euler, 3. Gráben e Arco Purus, 4. Geologia Estrutural, 5. Sistemas petrolíferos, 6. Bacias do Solimões e Amazonas. I. Landau, Luiz et al. II. Universidade Federal do Rio de Janeiro, COPPE, Programa de Engenharia Civil. III. Título.

À Fernanda, por cinquenta anos de respeito, consideração e amor

“Magnus magnes ipse est globus terrestris”

A terra inteira é um imã.

De Magnet – William Gilbert, 1600.

Onde estavas tu, quando eu lançava

os fundamentos da terra?

Faze-mo saber, se tens entendimento.

Quem lhe fixou as medidas,

se é que o sabes,

ou quem a mediu com o cordel?

Sobre que foram firmadas

as suas bases, ou quem

lhe assentou a pedra de esquina?

Livro de Jó 38:4-6.

Cerca de 2000 A.C.

AGRADECIMENTOS

A Deus, que me levou a estudar geologia, e assim compreender melhor este mundo em que vivemos.

À minha mãe Isabel, que mesmo não estando mais presente, permanece viva, como mulher digna, responsável e incentivadora de uma vida mais humana e produtiva a serviço do bem comum.

À minha esposa Fernanda, bem como aos filhos Marcos, Anabel, Débora e Daniela e aos netos Davi, Melissa, Amanni, Nicholas, Guilherme e Giulia, que me trazem a certeza que, mesmo partindo, eles continuarão a levar a mensagem de esperança de um mundo melhor.

Quero agradecer ainda ao orientador e amigo Dr. Luiz Landau, coordenador do Laboratório de Métodos Computacionais em Engenharia (LAMCE), pelo apoio e incentivo em todas as etapas desta pesquisa, bem como aos professores Dr. Álvaro Luiz Coutinho, coordenador do Núcleo de Atendimento em Computação de Alto Desempenho (NACAD) e Dr. Ricardo Perez Bedregal, Diretor da Petroleum Geoscience Technologies (PGT, atualmente integrada na Vale), também orientadores, pelas sugestões visando a melhoria dos resultados obtidos.

Aos professores da pós graduação em Engenharia Civil – Sistemas Petrolíferos, da COPPE/UFRJ, pelo empenho em nos transmitir, da melhor maneira possível, conhecimentos atualizados e incentivos para incrementá-los, no esforço exploratório das bacias sedimentares.

Ao Dr. Agamenon Dantas, Presidente da Companhia de Pesquisa de Recursos Minerais e Dr. Ciro Appi, Diretor do CEDES/CPRM, bem como ao Dr. Sérgio Henrique Souza Almeida, Superintendente da SDT/ANP e ao Engenheiro João Batista de Vasconcelos Dias, Gestor do convênio ANP/CPRM, sem o apoio dos quais este trabalho não teria sido realizado. Também aos colegas, geofísicos Dr. Renato Lopes Silveira, do BDEP/ANP, e João Batista Freitas de Andrade, da CPRM, pela amizade e troca de experiências técnicas e científicas, que fazem com que as lides diárias se tornem mais amenas e prazerosas.

Agradeço ainda a Mônica, secretária do LAMCE, a Verônica, e Marco Antonio, do LAB2M, a Mara, secretária do NACAD, a Beth e Jairo do PEC aos ex-funcionários do LAB2M Allan e Tatiana além dos demais amigos e companheiros funcionários ou alunos da COPPE, alguns dos quais, já formados e atuando profissionalmente em outras instituições, sempre solícitos em nos ajudar, todas as vezes que os procurávamos.

Não posso também deixar de agradecer ao Dr. Marco Pólo Buonora, Gerente de Métodos Potenciais da Petrobras, por ter-me incentivado na investigação de recursos petrolíferos através da magnetometria e gravimetria, bem como ao geofísico Edgar Liandrat, da mesma Gerência, que, com seu vasto conhecimento da geologia regional, foi de grande ajuda na pesquisa bibliográfica realizada, e ao já aposentado Edyr de Oliveira, pelo seu exemplo de dignidade e grandeza diante dos infortúnios da vida. A tantos outros geofísicos ou técnicos do Setor de Métodos Potenciais – SEMEPO – da Petrobras, que por lá passaram, ou ainda lá continuam, dando sua contribuição ao desenvolvimento energético da Nação.

Quero agradecer também a todos os membros da banca examinadora, por sua valiosa contribuição através das correções e revisões apresentadas para elaboração do documento final.

Espero, com a graça de Deus, que o conhecimento adquirido que veio se somar ao já existente possa ser utilizado para geração de riquezas e melhoria social do nosso povo, verdadeiro patrocinador desta árdua e desafiadora, porém recompensadora tarefa.

Resumo da Tese apresentada à COPPE/UFRJ como parte dos requisitos necessários para a obtenção do grau de Doutor em Ciências (D. Sc.)

CARACTERIZAÇÃO GEOMAGNÉTICA DO GRÁBEN PURUS E SUAS IMPLICAÇÕES NA EVOLUÇÃO DAS BACIAS DO SOLIMÕES E DO AMAZONAS

Marcos de Barros Munis

Dezembro / 2009

Orientadores: Luiz Landau

Álvaro Luiz Gayoso de Azeredo Coutinho

Programa: Engenharia Civil

O Gráben Purus, uma feição de grande espessura de sedimentos do Proterozóico superior, coincide, em seu limite leste, com o Arco Purus. Este separa as bacias do Solimões e do Amazonas e foi definido no final da década de cinquenta, baseado em dados de poços e sísmica refração. A leste de seu eixo ocorrem sedimentos devonianos. Na região do arco, a seqüência carbonífera superior (Pensilvaniano) está em contato direto com rochas do neo-Proterozóico, e o Devoniano (ou mesmo Siluriano) só volta a ocorrer a mais de 200 km a oeste do eixo do arco.

Com as descobertas de óleo, gás e condensado na Bacia do Solimões o conhecimento geológico aumentou muito nesta bacia, porém os estudos vão escasseando para leste, em direção ao eixo do arco e o mesmo ocorre na Bacia do Amazonas, quando se vai para oeste em direção ao mesmo arco. Recentemente, foi sugerido um gráben invertido na região, porém seus limites e comportamento estrutural permanecem ainda nebulosos. Esta tese utiliza antigos dados aeromagnéticos reprocessados e micronivelados, aos quais se aplicou a redução ao pólo, a continuação para cima, a deconvolução de Euler e a inclinação do sinal analítico, que, juntos com dados gravimétricos terrestres e descrição dos poucos poços disponíveis permitiu um significativo aumento no conhecimento do comportamento estrutural do gráben, de seus limites e da influência na propagação de esforços tectônicos, os quais propiciaram diferentes assinaturas magnéticas nas duas bacias. Feições magnéticas provenientes de fontes profundas, paralelas ao atual curso do rio Solimões/Amazonas, são evidências claras de atividades neotectônicas na região.

Abstract of Thesis presented to COPPE/UFRJ as a partial fulfillment of the requirements for the degree of Doctor of Sciences (D. Sc.)

PURUS GRABEN GEOMAGNETIC SIGNATURE AND ITS IMPLICATIONS
ON SOLIMÕES AND AMAZON BASINS EVOLUTION

Marcos de Barros Munis

December / 2009

Advisors: Luiz Landau

Álvaro Luiz Gayoso de Azeredo Coutinho.

Department: Civil Engineering

The Purus arch separating the Solimões and Amazon basins was described in the late fifties, based on well data and seismic refraction. To the east of its axis occur Devonian sediments. Over the arch, the Upper Carboniferous sequence (Pennsylvanian) is in direct contact with neo-Proterozoic rocks, and Devonian (or even Silurian) only occurs more than 200 km west of the axis of the arc.

With the discovery of oil, gas and condensate in the Solimões basin, geological knowledge has increased substantially but the studies are scarce to the east toward the axis of the arc and the same occurs in the Amazon basin when going west toward the same arc.

Recently, it was suggested an inverted graben in the region, but their limits and structural behavior are still fuzzy. This thesis uses old aeromagnetic data, reprocessed and microlevelled, with reduction to the pole, upward continuation, Euler deconvolution and the tilt derivative techniques, which linked with land gravity data, and description of some few available wells, allowed a significant increase in the structural behavior of the graben, its boundaries, and influence in the propagation of tectonic forces, which brought about different magnetic signatures on both basins, offering alternatives that can result in lower operating costs in the exploration effort. Magnetic anomalies patterns from deep sources, indicates neotectonic activities, controlling the entire Solimões-Amazonas river channel.

SUMÁRIO

1.	Introdução	1
	1.1 – Motivação.	2
	1.2 – Localização e interesse exploratório.	3
	1.3 – A interpretação automática de dados potenciais.	3
	1.4 – A ambigüidade na interpretação dos dados potenciais.	5
	1.5 - As limitações específicas na região investigada.	5
	1.6 – Objetivos.	5
2 .	Geologia das bacias do Solimões e do Amazonas	8
	2.1 – Introdução	8
	2.2 – Desenvolvimento tectono-estrutural	11
	2.3 – O Arco Purus	21
	2.4 – Magmatismo e sistemas petrolíferos Jandiatuba-Juruá (!) e Barreirinha-Curiri (!)	23
	2.5 – As intrusões ígneas nas bacias do Solimões e do Amazonas. . .	31
3.	Dados Utilizados	35
	3.1 – Dados de poços.	35
	3.2 – Dados gravimétricos	39
	3.3 - Dados magnetométricos	40
4.	Compatibilização, reprocessamento e integração dos dados	42
	4.1 – Dados gravimétricos	42
	4.2 – Dados magnetométricos	45
	4.2.1 - Projetos Manaus Leste e Manaus Oeste (características). . .	45
	4.2.2 – Projetos Coari e Carauari (características)	46
	4.2.3 – Re-processamento dos dados	47
	4.2.4 – Junção dos projetos	50
5 .	Metodologia e Filtros utilizados	52
	5.1 – Derivadas – sinal analítico	52

5.2 – Continuação para cima	54
5.3 – Redução ao pólo	55
5.4 – Filtros Butterworth – coseno direcional – Naudy	57
5.5 – Deconvolução de Euler	60
6. Interpretação dos dados	63
6.1 – O arcabouço tectônico regional	63
6.1.1 – Fontes gravimétricas.	65
6.1.2 – Fontes magnéticas profundas.	66
6.2 – Os diques e soleiras – fontes magnéticas médias e rasas	73
6.3 – Interpretação integrada dos dados magnéticos	76
6.4 – Evidências de neo-tectonismo	83
7. Conclusões e Recomendações.	88
8. Referências Bibliográficas	92

Índice das Figuras

1.1 – Mapa de localização do Arco Purus.	6
1.2 – Mapa de localização dos projetos aerogeofísicos estudados.	7
2.1 – Domínios tectono-sedimentares da Placa Sul-Americana.	9
2.2 - Principais bacias paleozóicas na América do Sul.	10
2.3 – Coluna crono-estratigráfica da Bacia do Solimões.	13
2.4 – Coluna crono-estratigráfica da Bacia do Amazonas.	14
2.5 – Seção geológica longitudinal da Bacia do Solimões.	15
2.6 - Seção geológica longitudinal da Bacia do Amazonas.	15
2.7 – Modelo proposto de gráben invertido na região do Arco Purus.	15
2.8 – Detalhe estrutural do <i>trend</i> do Juruá.	20
2.9 – Distribuição percentual cronológica (K/Ar) baseada em 377 amostras de basalto/diabásio que ocorrem nas bacias sedimentares brasileiras.	24
2.10 – Bacia do Solimões – maturação da Formação Jandiatuba.	25

2.11 – Bacia do Solimões – Influência da terceira soleira no grau de maturação da matéria orgânica.	25
2.12 – Região produtora da Bacia do Solimões.	26
2.13 – Esboço estrutural da Bacia do Amazonas, com localização das principais ocorrências de óleo e gás.	28
2.14 – Eventos do sistema petrolífero Jandiatuba-Juruá (!).	29
2.15 – Eventos do sistema petrolífero Barreirinha-Curiri (!).	30
3.1 - Mapa de localização dos poços e perfis utilizados nesta tese, sobre a drenagem principal.	36
3.2 – Legenda e perfis A-A` e B-B`	37
3.3 – Perfis C-C` ; D-A` ; E-E` e E-F`	38
3.4 – Mapa Bouguer da Região Norte do Brasil, com localização dos projetos aerogeofísicos estudados.	39
4.1 – Mapa Bouguer reprocessado, da região do Arco Purus (expandida), com localização dos pontos de amostragem.	45
4.2 – Mapas originais (recuperados), do campo magnético total, reduzido de “datuns” arbitrários, dos projetos Manaus Oeste e Manaus Leste.	46
4.3 – Mapas originais do campo magnético total, reduzido do IGRF, dos projetos Carauari e Coari.	47
4.4 – Projeto Coari – Etapas do micronivelamento (A - Dados originais ; B – erros de nivelamento ; C – dados nivelados).	49
4.5 – Mapa da componente total do campo magnético terrestre, reduzido do IGRF, nivelado, continuado, compatibilizado e filtrado.	51
5.1 – Atenuação do filtro continuação para cima.	55
5.2 – Atenuação do filtro Butterworth.	58
5.3 – Atenuação do filtro coseno direcional.	59
6.1 – Arcabouço estrutural conhecido das bacias do Solimões e do Amazonas .	64
6.2 – Mapa gravimétrico da região do Arco Purus, obtido com dados do satélite Grace, compilados com dados da Petrobras.	66
6.3 – Campo magnético total, continuado para 10 km e reduzido ao pólo . . .	67
6.4 – Fontes magnéticas profundas (< - 4 km), obtidas com a deconvolução de Euler, com janela quadrada de 20 km de lado, para diques e soleiras (A), falhas de grande rejeito (B) e chaminés (C).	69

6.5 – Interpretação de dados magnéticos da região do Arco Purus, continuados a 10 km e reduzidos ao pólo.	72
6.6 – Fontes magnéticas de média profundidade (- 4 a -2 km), obtidas com a deconvolução de Euler, com janela quadrada de 20 km de lado, para diques e soleiras (A), falhas de grande rejeito (B) e chaminés (C).	74
6.7 – Fontes magnéticas rasas (> - 2 km), obtidas com a deconvolução de Euler, com janela quadrada de 20 km de lado, para diques e soleiras (A), falhas de grande rejeito (B) e chaminés (C).	75
6.8 – Mapa da inclinação do sinal analítico magnético da região do Arco Purus.	77
6.9 – Interpretação estrutural sobre o mapa da inclinação do sinal analítico magnético	78
6.10 – Modelo de acumulação de hidrocarbonetos na Bacia do Solimões: soleiras dobradas concordantes com o pacote sedimentar (Orogênese Juruá).	80
6.11 – Comparação entre <i>trends</i> estruturais conhecidos e <i>trends</i> magnéticos: (A) <i>Trends</i> mapeados por sísmica e comprovados por poços (Eiras, 1999; Barata e Caputo, 2007), (B) Mapa da inclinação do sinal analítico, (C) <i>Trends</i> magnéticos principais (eixos de anticlinais em soleiras) e Secundários (falhas, diques ou terminações de soleiras).	82
6.12 – Linha sísmica 392 interpretada, evidenciando as soleiras dobradas e falhadas, que propiciaram a formação das anomalias magnéticas de alta frequência.	83
6.13 – Epicentros de terremotos no Brasil.	84
6.14 – Relevo topográfico da região estudada	85
6.15 – Hidrografia, topografia e principais estruturas magnéticas reativadas neotectonicamente.	86

Índice das Tabelas

3.1 – Principais parâmetros dos levantamentos aeromagnetométricos.	41
5.1 – Valores médios do campo magnético na área de estudo.	57
5.2 – Índices estruturais para diferentes corpos magnéticos ou gravimétricos. .	62

Capítulo 1

Introdução

Ao final da década de 1950, a Petrobras já havia perfurado 78 poços na Bacia Amazônica e, baseado nesses poços, bem como em dados de sísmica refração, Morales (1959) descreveu três arcos regionais: o “Divisor de Iquitos”, o “Arco de Purus” e o “Arco de Gurupá”. Com o aumento do conhecimento geológico adquirido, atualmente se define o Arco de Iquitos como divisor das bacias do Acre e do Solimões, o Arco Purus como limite desta e a do Amazonas e o Arco Gurupá, separando esta última da Bacia de Marajó.

Em 1959 e 1960, no início da utilização de levantamentos aerogeofísicos no Brasil, foram obtidos dados aeromagnéticos na região oeste da Bacia do Amazonas, incluindo parte do Arco Purus. Os dois projetos, denominados Manaus Leste e Manaus Oeste, tiveram seus dados extraviados e parcialmente recuperados através da digitalização de antigos mapas de contorno. Posteriormente, levantou-se os Projetos Carauari e Coari, com melhores técnicas de aquisição, porém ainda com sérios problemas de processamento. No capítulo terceiro, mostraremos como foi possível agregar valor aos mesmos, compatibilizando-os entre si e com projetos mais recentes, visando fornecer novos subsídios interpretativos na região do Arco Purus.

A Bacia do Solimões é produtora de gás e óleo de alta qualidade, mas seus custos exploratórios são altíssimos, não só devido às peculiaridades geográficas da região, como também devido à presença de inúmeras soleiras e diques de diabásio. A ocorrência dessas rochas, se por um lado dificulta os trabalhos interpretativos com métodos sísmicos e de perfuração, por outro propicia as diferenças de suscetibilidades magnéticas e de densidades dentro dos pacotes sedimentares, caracterizando de modo distinto as duas bacias e fornecendo parâmetros para otimização de sua interpretação.

Os dados gravimétricos utilizados são, em sua maioria, da década de sessenta e, apesar de sua boa qualidade, por não terem sido obtidos em uma malha

regular e densa, são limitados no que se refere a interpretações quantitativas, visando profundidades das fontes causadoras. Por isso, esses dados foram usados apenas como complemento, em interpretações qualitativas. Atualmente, a Agência Nacional do Petróleo (ANP) vem realizando aerolevantamentos sistemáticos de magnetometria e gravimetria nas bacias paleozóicas brasileiras, sendo a do Solimões e região do Arco Purus, um de seus próximos objetivos.

1.1 – Motivação

A ANP dispõe de um grande acervo de dados aeromagnéticos e gravimétricos terrestres, já tornados públicos e acessíveis a empresas ou instituições interessadas. Informações valiosas estão contidas nesses dados, pois os contrastes de densidade ou de susceptibilidade magnética das rochas da crosta terrestre modificam os campos gravimétrico ou magnético.

Apesar de ruidosos, um criterioso tratamento utilizando as novas ferramentas computacionais atualmente disponíveis permitiu um significativo aumento na relação sinal/ruído, trazendo um novo enfoque interpretativo na região do Arco Purus. Devido aos constantes e onerosos investimentos aplicados na pesquisa e desenvolvimento dos métodos sísmicos, e sua recompensadora retribuição, os métodos potenciais têm sido negligenciados, ou pelo menos subutilizados, na exploração dos recursos petrolíferos.

Este estudo demonstra que, mesmo utilizando-se dados aeromagnéticos antigos, de baixa qualidade para os padrões atuais, em uma região cujas características geográficas e geológicas regionais não favorecem um bom contraste magnético para formação do campo induzido, pode-se obter informações até então desconhecidas, sobre o comportamento geomagnético das bacias do Solimões e do Amazonas. Tal informação inclui desde a fase de pré-formação das mesmas, registrada no comportamento das anomalias de baixa frequência, até os dias atuais, onde as médias e altas frequências devidas a fontes magnéticas situadas nos diques e soleiras são capazes de dar um novo enfoque exploratório nessas bacias.

1.2 – Localização e interesse exploratório

A Bacia do Amazonas, com cerca de 500.000 km² de extensão, é muito pouco conhecida geologicamente, apesar de seus 174 poços exploratórios, dos quais 47 com indícios de óleo (1 descobridor de campo de gás e 1 produtor sub-comercial de óleo) e 33.000 km de sísmica 2D, além de reconhecimentos gravimétricos e levantamentos aeromagnéticos ⁽¹⁾. A Bacia do Solimões, com 450.000 km² de extensão, por ser produtora (óleo/gás em Urucu e gás em Juruá), tem sido objeto de maiores atenções. De 2000 a 2005, a ANP ofereceu apenas 2 blocos para exploração na Bacia do Amazonas e nenhum deles despertou interesse nas companhias de petróleo. Em 2008, na X Rodada, foram oferecidos 8 blocos, sendo 4 arrematados. Por outro lado, de 2000 a 2005, foram oferecidos 30 blocos na Bacia do Solimões, tendo 26 deles sido arrematados.

A Figura 1.1 mostra a localização da região do Arco Purus no contexto das bacias sedimentares brasileiras e a Figura 1.2 a localização dos projetos aerogeofísicos estudados, ferramenta principal, nesta tese, para delimitação dos limites do arco.

1.3 – A interpretação automática de dados potenciais

Durante o período de aquisição dos dados dos projetos Manaus Oeste e Manaus Leste, as técnicas interpretativas eram essencialmente qualitativas, utilizando-se também métodos gráficos para interpretação quantitativa de perfis. Esses métodos possibilitavam a elaboração de perfis geológicos 2D e, em alguns casos, o que os geofísicos denominavam 2,5D (Telford *et al.* 1990), onde além do comprimento ao longo do perfil e da profundidade, utilizava-se uma largura fixa estimada para o corpo causador da anomalia.

Com o avanço da informática, aliado ao desenvolvimento de novos equipamentos de aquisição aerogeofísica e posicionamento das estações, foi grande

⁽¹⁾ Dados da ANP – 4ª Rodada de Licitações, 2003.

o aumento do volume de dados a serem analisados. Assim, a partir da década de 1970, foram desenvolvidos métodos de interpretação automática, a princípio em perfis (2D) e logo em seguida em malhas regulares (3D).

Werner (1953) propôs um método de separação de anomalias magnéticas, modelando “diques finos”, que foi expandido para outros modelos por Hartman *et al* (1971) e Ku e Sharp (1983), que ficou conhecido como *Deconvolução de Werner*, tornando-se muito popular entre os intérpretes geofísicos devido a sua facilidade de programação, bem como sua eficácia na separação de anomalias regionais-residuais. Recentemente, Hansen (2005) apresentou uma aplicação da Deconvolução de Werner em 3D.

Naudy (1971) apresentou outro método, modelando placas e prismas verticais para determinar profundidades de fontes em perfis aeromagnéticos, enquanto O'Brien (1972), utilizando a propriedade de que as derivadas horizontais e verticais do campo magnético são a transformada de Hilbert uma da outra, desenvolveu um método para calcular profundidades das fontes, que ficou conhecido como “CompuDepth”. Nabighian (1972, 1974, 1984) utilizou o sinal analítico da função, com a mesma finalidade. A análise espectral no domínio da frequência é também utilizada para determinação indiscriminada de profundidades de fontes de campos potenciais, conforme mostram, entre vários autores, Spector e Grant, (1970), Treitel *et al.* (1971) e Blakely e Hassanzadeh (1981).

Os métodos automáticos para determinação de profundidades de fontes magnéticas baseados na equação de Euler foram desenvolvidos por Thompson (1982) e estendidos para o caso 3-D por Reid *et al.* (1990). A teoria do método, seu desenvolvimento e limitações interpretativas serão tratados detalhadamente no capítulo 5.

1.4 – A ambigüidade na interpretação dos dados potenciais

Um determinado modelo geológico responde com uma resposta gravimétrica definida, desde que se saibam as densidades dos corpos que formam o modelo, e com uma resposta magnética, desde que se saibam as susceptibilidades magnéticas dos diferentes corpos, bem como os parâmetros do vetor magnetização (induzida mais remanescente). O problema inverso, ou seja, a obtenção de um modelo geológico a partir da resposta gravimétrica ou magnética, já não responde com um só modelo, mas a inúmeros, daí a conhecida ambigüidade da interpretação dos métodos potenciais, levando o intérprete a utilizar outras informações geológicas ou geofísicas independentes para elaboração do modelo mais aceitável.

1.5 - As limitações específicas na região investigada

Além das limitações na qualidade dos dados já mencionadas, a região investigada se situa próxima ao equador magnético, o que faz com que os corpos alinhados com direções próximas do norte magnético tenham magnetizações induzidas próximas de zero. Felizmente, a direção predominante das feições geológicas é próxima de E-W, mas a aplicação de técnicas como a redução ao pólo, por exemplo, fica grandemente prejudicada. Outra limitação interpretativa é a natureza litológica das rochas que compõem o substrato das bacias paleozóicas (Grupo Purus, do Proterozóico, ou embasamento cristalino do Pré-Cambriano indiviso), ambos com baixa susceptibilidade magnética (principalmente o primeiro), diminuindo o contraste com as rochas sedimentares paleozóicas.

1.6 – Objetivos

O principal objetivo do presente trabalho é caracterizar geomagneticamente as bacias do Solimões e do Amazonas na região do Gráben Purus e sua relação com o Arco Purus, mostrando suas diferenças estruturais e implicações genéticas de modo a contribuir para o incremento do conhecimento geológico desta importante feição regional.

Além do aumento do conhecimento geológico-estrutural, um outro objetivo é mostrar a necessidade e o valor de caracterizar-se magneticamente as outras bacias sedimentares brasileiras, com os dados já disponíveis e tornados públicos pela atual legislação petrolífera brasileira. Se obtivemos sucesso na caracterização geomagnética dessas bacias, as primeiras que foram objeto de levantamentos aeromagnéticos no Brasil, muito mais devemos obter nos levantamentos posteriores com melhor resolução das medidas, maior precisão do posicionamento das estações com o uso do GPS e substancial aumento do ganho dos compensadores dos ruídos provocados pelas aeronaves.



Figura 1.1 – Mapa de localização do Arco Purus

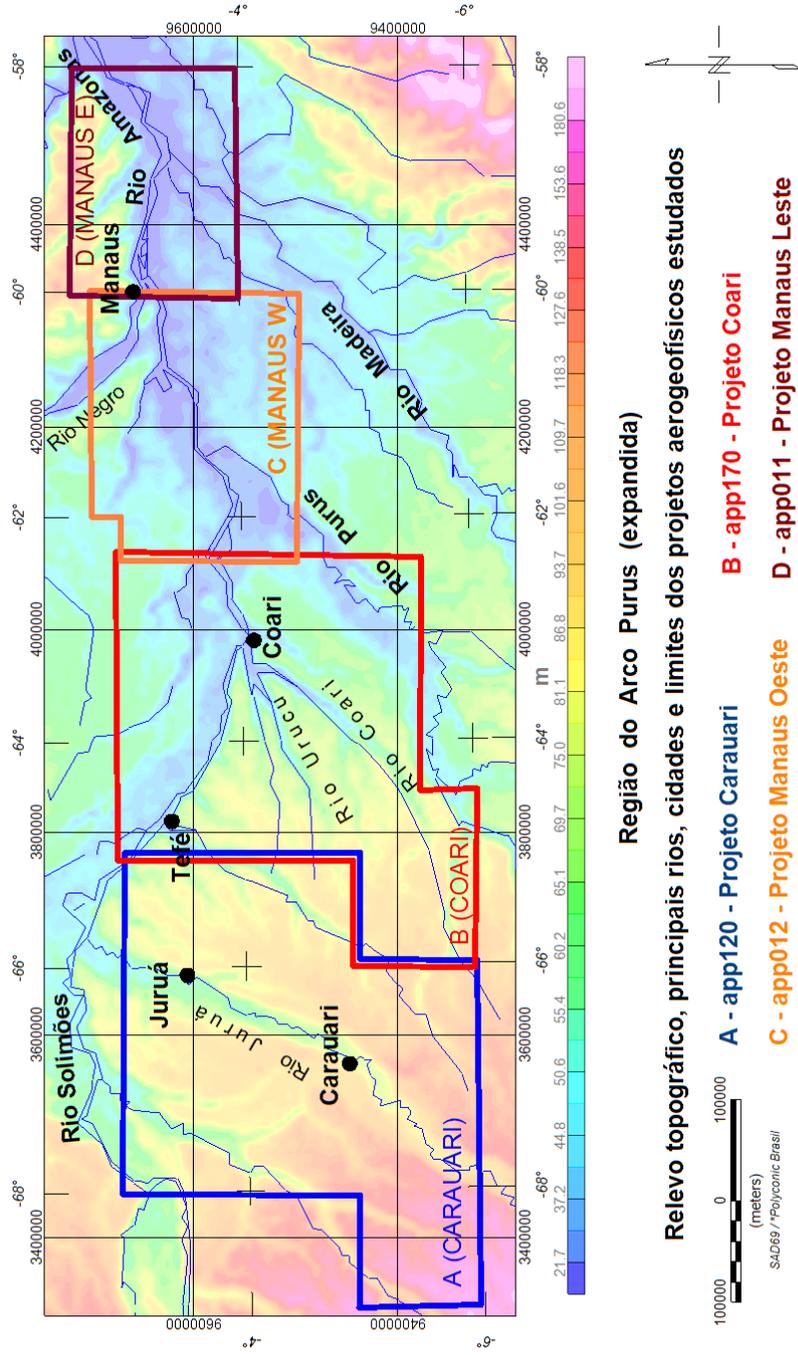


Figura 1.2 - Mapa de localização dos projetos aerogeofísicos estudados

Capítulo 2

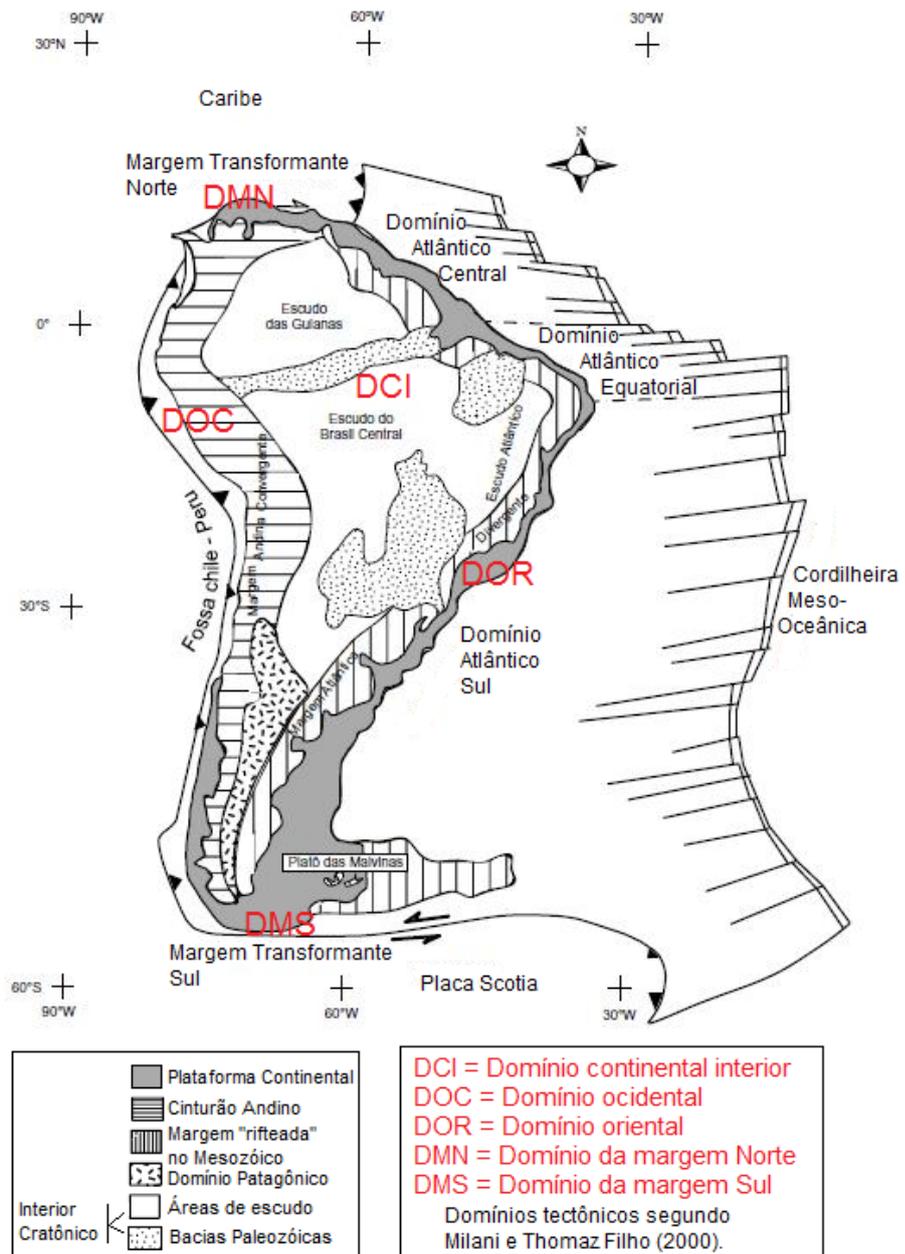
Geologia das bacias do Solimões e do Amazonas

2.1 – Introdução

As bacias do Solimões e do Amazonas fazem parte da Província Estrutural do Amazonas, de idade fanerozóica, dentro da Placa Sul-Americana, de acordo com os conceitos emitidos por Almeida *et al.* (1981), seguindo a tendência de estudos geológicos regionais em países de dimensões continentais como o Canadá e a Austrália.

Milani e Thomaz Filho (2000) apresentam um estudo sobre a evolução tectônica da Placa Sul-Americana, destacando quatro grandes domínios sedimentares: o domínio continental interior, formado por bacias intracontinentais com espessas seqüências do Paleozóico e Mesozóico; o domínio ocidental, na região da costa do Pacífico, em margem de placa convergente, formando o grande cinturão orogenético dos Andes; o domínio oriental, na costa do Atlântico, em margem divergente, formado pela quebra do paleocontinente Gondwana; os domínios das margens norte e sul da placa, formados por regimes tectônicos transcorrentes regionais no contato com as placas do Caribe e da Scotia, respectivamente (Fig. 2.1). Estes autores apresentam ainda um mapa com as principais depressões paleozóicas da América do Sul e seus arcos regionais controladores, onde destacamos, numerados de 1 a 4, aqueles que afetam a Província Estrutural do Amazonas (Fig. 2.2). Os arcos de Iquitos, Purus e Gurupá separam as grandes bacias paleozóicas e foram descritos por Morales (1959), nos primórdios da exploração geológica de sub-superfície na região amazônica. O Arco de Carauari foi descrito pouco depois, como resultado dos avanços exploratórios para pesquisa de petróleo pela Petrobrás. O Arco de Iquitos separa a Bacia do Acre da Bacia do Solimões e o Arco Purus separa as bacias do Solimões e do Amazonas. O Arco Carauari fica dentro da Bacia do Solimões, dividindo esta em duas sub-bacias: Jandiatuba, a oeste e Juruá a leste. Esta última tem sido a mais investigada,

pois atualmente é produtora de gás na região do rio Juruá e óleo/gás (condensado) na região do rio Urucu. O Arco Gurupá, já na região da Ilha de Marajó, separa as bacias do Amazonas e Foz do Amazonas, com estilo tectônico bem diferente, ligado à separação continental do final do Triássico e início do Jurássico (186 a 222 Ma conforme datações em vulcânicas toleíticas – (Brandão e Feijó, 1994). Um outro arco que não aparece na Figura 2.2 é o de Monte Alegre, dentro da Bacia do Amazonas, a NE de Santarém, no Pará.



Modificado de Bedregal (2005)

Figura 2.1 - Domínios tectono-sedimentares da Placa Sul-Americana

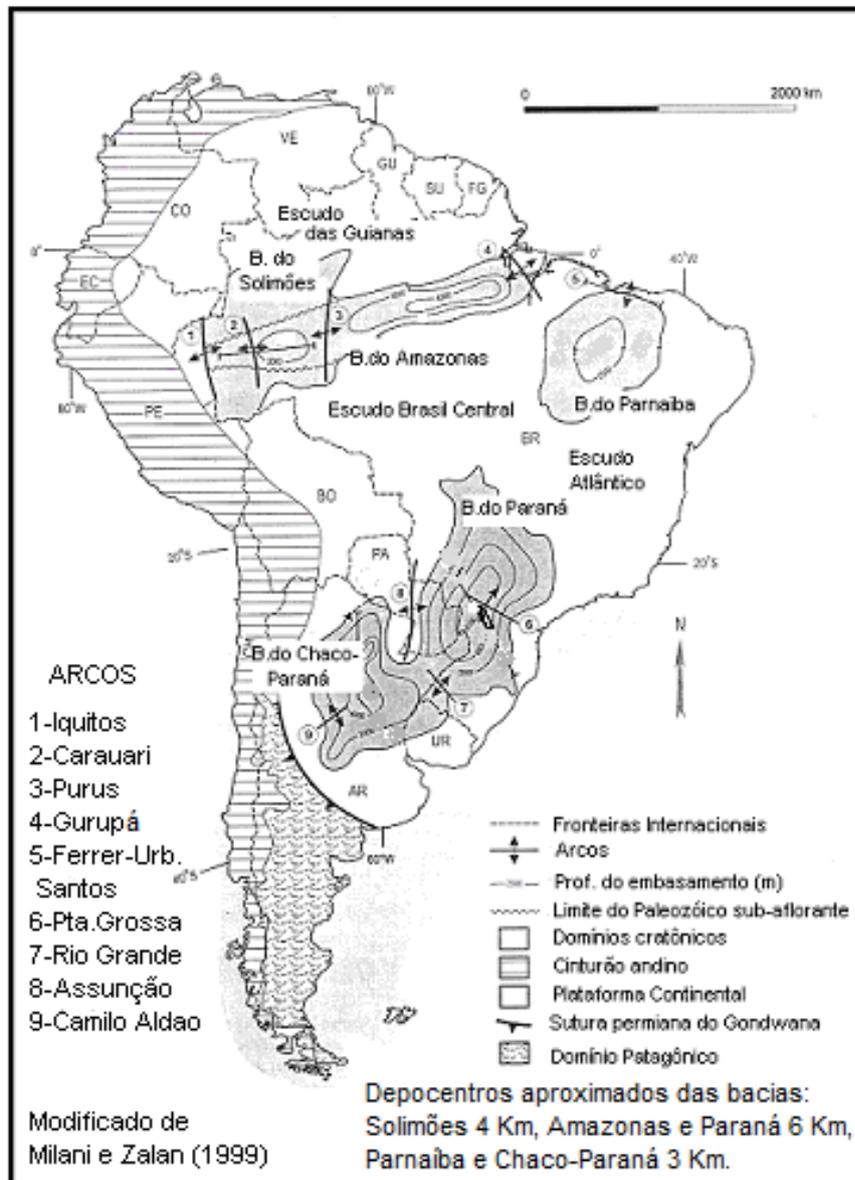


Figura 2.2 - Principais bacias paleozóicas na América do Sul.

2.2 – Desenvolvimento tectno-estrutural

A Plataforma Sul-Americana tem sido objeto de vários estudos, destacando-se, no Brasil, os clássicos de Almeida (1967, 1969). Desde então, novos dados vêm sendo acrescentados, mas as premissas básicas desse autor, dividindo a plataforma em quatro etapas, ou estágios evolutivos, permanecem básicas para definições, correlações e análises diversas do Fanerozóico brasileiro (Zalan, 2004).

Durante o Proterozóico Superior, duas placas antigas (Guaporé e São Francisco) estavam sendo soldadas através de extensas faixas de dobramentos do Ciclo Orogenético Brasileiro (ou Baicaliano, segundo Almeida, 1967), acompanhado de todos os eventos deformacionais, intrusivos, metamórficos e sedimentares característicos das orogenias. Esses fenômenos ocorreram no intervalo de 890 a 490 Ma (Brito Neves, comunicação oral, *in* Zalan, *op.cit.*), ou de 725 a 500 Ma, segundo Almeida e Carneiro (2004), em diversos locais, não só no continente sul-americano, como no africano, levando à consolidação do super-continente de Gondwana. Só no Neo-Cretáceo, a Plataforma Sul-Americana foi individualizada como entidade separada do Gondwana.

Na região da Bacia do Solimões, sub-bacia do Juruá, é conhecido um sistema de rifts do Proterozóico Superior, com rochas siliciclásticas das formações Prosperança ⁽²⁾ e Acari, separadas por discordância, sotoposto à seqüência paleozóica do Solimões (Eiras, 1998), o mesmo acontecendo na Bacia do Amazonas (Gonzaga *et al.*, 1997). A consolidação da plataforma ocorreu ao final do ciclo orogenético brasileiro, o que constitui o primeiro estágio, segundo os conceitos de Almeida (*op. cit.*).

A segunda etapa neste processo evolutivo, conhecida como Paraplataforma Eopaleozóica, é um estágio de transição, que durou todo o Cambriano e Ordoviciano (540 a 440 Ma), caracterizando-se por uma diminuição dos processos de dobramentos. Uma fase distensiva, com magmatismo ácido a intermediário, como

² Schobbenhaus e Neves, (2003), colocam-na no Paleozóico Inferior (Cambro-Ordoviciano).

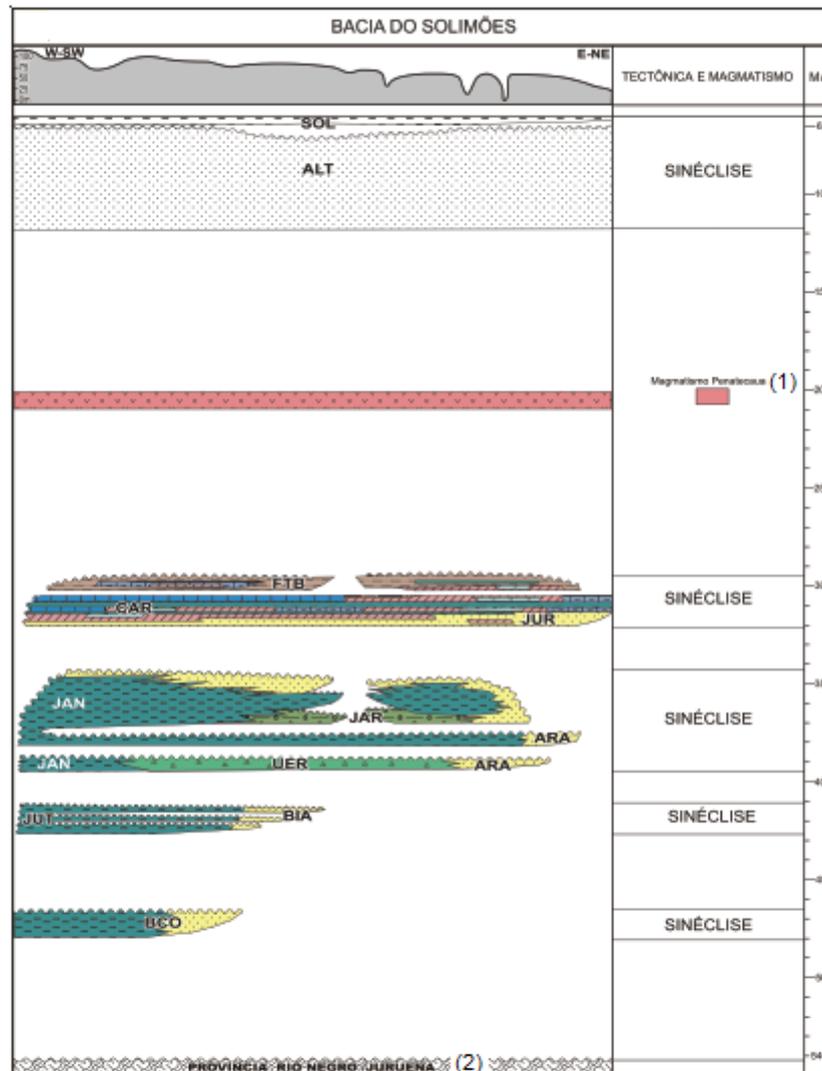
manifestação pós-tectônica do ciclo brasileiro, é citada por Almeida (1969), bem como, ocorrências do basalto Três Marias, como precursoras da Bacia do Paraná (Milani, 2004). A Formação Benjamim Constant, que só ocorre na parte oeste da Bacia do Solimões (sub-bacia Jandiatuba), constituída por sedimentos de mar raso provenientes da região peruana, e que não ultrapassaram o Arco de Carauari, representa a mais antiga ingressão marinha conhecida nas bacias intracratônicas paleozóicas brasileiras. Pelo seu conteúdo fossilífero, é datada como do Ordoviciano Inferior à Médio (Quadros, 1988), não sendo conhecidas outras formações a ela correlacionáveis nas demais bacias brasileiras.

A terceira etapa, denominada de ortoplataforma, é a mais significativa para o nosso estudo, indo do final do Ordoviciano ao Jurássico (440 a 135 Ma), caracterizando-se por uma calma tectônica notável, com transgressões e regressões marinhas regionais de caráter transcontinental, permitindo correlações litológicas e cronológicas entre as diversas bacias. Segundo Zalan (op. cit.), citando Almeida (op. cit.), duas fases são distinguíveis nessa etapa: a fase **talassocrática**, do Siluriano ao Permiano e a fase **geocrática**, do Triássico ao Jurássico. Na primeira fase, são formadas as grandes sinéclises paleozóicas e os arcos regionais são realçados isostaticamente, como resposta à subsidência nas sinéclises, delimitando as bacias. Amplas oscilações de caráter epirogenético trazem transgressões e regressões marinhas facilmente correlacionadas nas bacias do Solimões, do Amazonas, do Parnaíba e do Paraná. Na fase geocrática, a plataforma sofre ascensão, com forte erosão, não favorecendo a sedimentação, exceto de pequenas representações eólicas, calcários, depósitos salíferos e manifestações ígneas representadas pela presença de soleiras de diabásio.

A partir do final do Ordoviciano, na Bacia do Amazonas ou do Eo-Siluriano na Bacia do Solimões, quatro grandes megaseqüências são reconhecidas. Estas megaseqüências correspondem a quatro eventos tectono-termiais conforme os estudos de Cunha *et al.* (1994, 2007) na Bacia do Amazonas.

As Figuras 2.3 e 2.4 mostram as mais recentes colunas estratigráficas das bacias do Solimões, segundo Wanderley Filho *et al.* (2007), e do Amazonas,

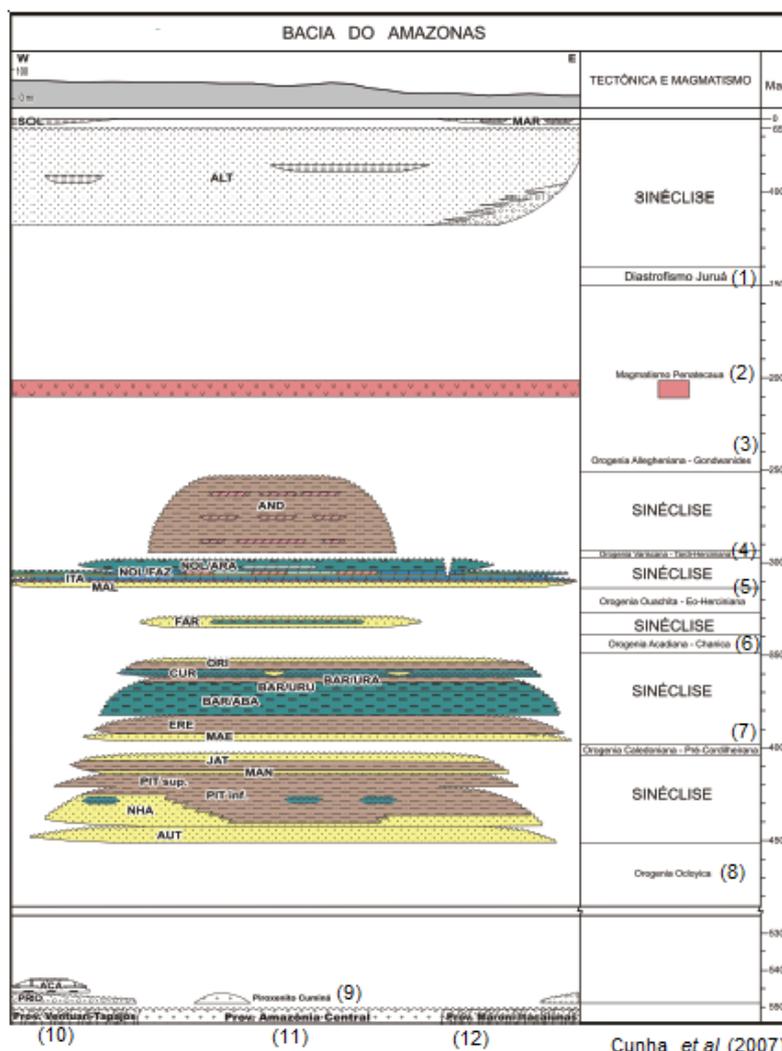
segundo Cunha *et al.* (2007). As Figuras 2.5 e 2.6 representam seções geológicas das respectivas bacias, segundo Wanderley Filho *et al.* (2006), para a Bacia do Solimões, e Cunha *et al.* (1994), para a Bacia do Amazonas. A Figura 2.7 de Wanderley Filho *et al.* (2006) sugere a existência de um gráben invertido na região do Arco Purus, o que é corroborado neste trabalho.



Wanderley Filho *et al.* (2007).

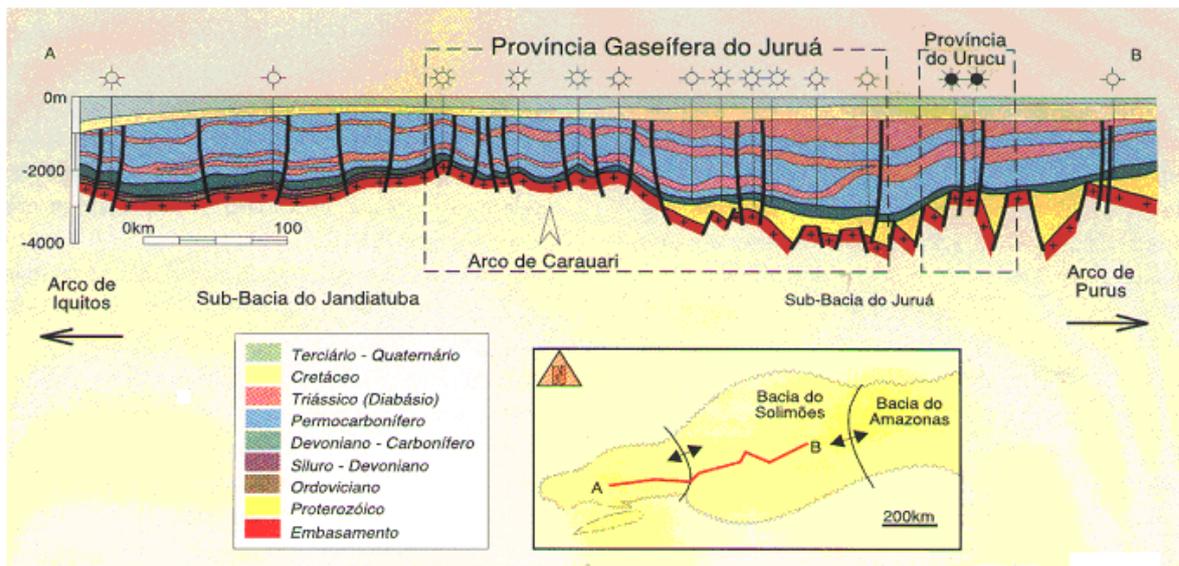
OBSERVAÇÕES: (1) Magmatismo Penatecaua; (2) Província Rio Negro-Juruena.
 SIGLAS: SOL= Formação Solimões; ALT= F. Alter do Chão; FTB= F. Fonte Boa; CAR= F. Carauari;
 JUR= F. Juruá; JAN= F. Jandiatuba; JAR= Membro Jaraqui da F. Jandiatuba; UER= F. Uerê;
 ARA= M. Araú da F. Uerê; JUT= F. Jutai; BIA= M. Biá da F. Jutai; BCO= F. Benjamin Constant.

Figura 2.3 - Coluna crono-estratigráfica da Bacia do Solimões.



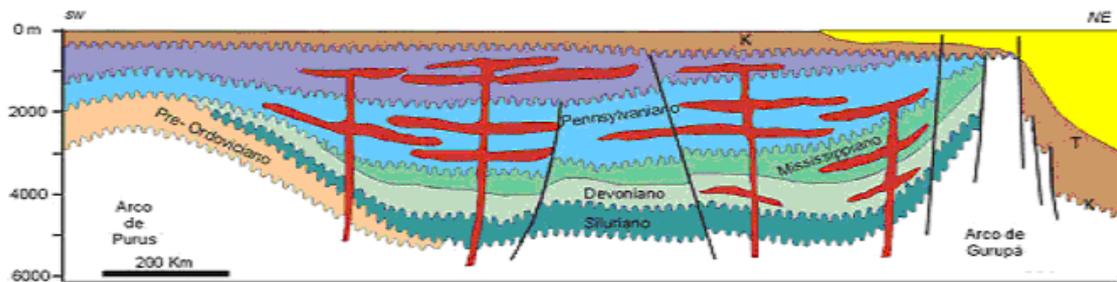
OBSERVAÇÕES: (1) Diastrófico Juruá; (2) Magmatismo Penatecaua; (3) Orogenia Allegheniana ou Gondwanides; (4) Orog. Variscana ou Tardi-Herciniana; (5) Orog. Ouachita ou Eo-Herciniana; (6) Orog. Acadiana ou Chanica; (7) Orog. Caledoniana ou Pré-Cordilheirana; (8) Oro. Ocloyica; (9) Piroxenito Cuminá; (10) Província Ventuari-Tapajós; (11) Prov. Amazônia-Central; (12) Prov. Maroni-Itacaiúnas. SIGLAS: SOL= Formação Solimões; MAR= F. Marajó; ALT= F. Alter do Chão; AND= F. Andará; NOL/ARA= F. Nova Olinda, Membro Arari; NOL/FAZ= F. Nova Olinda, M. Fazendinha; ITA= F. Itaituba; MAL= F. Monte Alegre; FAR= F. Faro; ORI= F. Oriximiná; CUR= F. Curiri; BAR/URA= F. Barreirinha, M. Urariá; BAR/URU= F. Barreirinha, M. Urubu; BAR/ABA= F. Barreirinha, M. Abacaxis; ERE= F. Ererê; MAE= F. Maecuru; JAT= F. Jatapu; MAN= F. Manacapuru; PIT= F. Pitinga; NHA = F. Nhamundá; AUT = F. Autás Mirim; ACA= F. Acari; PRO= F. Prosperança.

Figura 2.4 - Coluna crono-estratigráfica da Bacia do Amazonas



Wanderley Filho et al (2006).

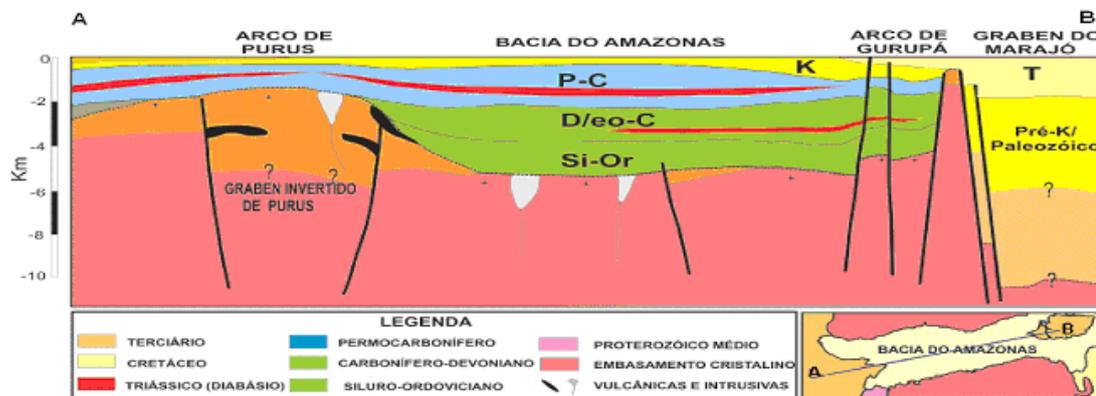
Figura 2.5 - Seção geológica longitudinal da Bacia do Solimões



(Em vermelho, diques e soleiras do diabásio Penatecauá)

Cunha et al (1994).

Figura 2.6 - Seção geológica longitudinal da Bacia do Amazonas.



Wanderley Filho et al. (2006)

Figura 2.7 - Modelo proposto de graben invertido na região do Arco Purus.

Na Bacia do Amazonas, do Ordoviciano Superior ao Devoniano Inferior, foi depositado o Grupo Trombetas (Formações Autás-Mirim, Nhamundá, Pitinga e Manacapuru), em ambiente nerítico, alternando com seqüências de ambiente flúvio-deltaico, litorâneo, glacial, tendo o mar penetrado na bacia vindo do leste (região de Marajó), prosseguindo até a região do Arco Purus. As formações basais, Autás-Mirim e Nhamundá, são constituídas predominantemente por arenitos com intercalações de folhelhos, seguindo-se os folhelhos da Formação Pitinga. Segundo Neves (1989), os folhelhos silurianos desta formação são possíveis geradores de HC, o que foi confirmado por Gonzaga *et al.* (1997). Cunha *et al.* (2007), com base em recente revisão palinológica dos sedimentos da bacia, introduziram a Formação Jatapu, antigo Membro Jatapu, da Formação Maecuru, do Grupo Urupadi, deslocando-a para o topo do Grupo Trombetas, encerrando este ciclo sedimentar.

Na Bacia do Solimões, após um grande hiato – cerca de 100 Ma - segundo Almeida e Carneiro (2004), depositou-se a Formação Jutai (Siluriano Superior ao Eo-Devoniano), constituída por folhelhos com uma fácies arenosa (membro Biá), com o mar proveniente do lado peruano, em movimentos transgressivos e regressivos, porém sem ultrapassar o Arco Purus.

Ainda no eo-Devoniano, na Bacia do Amazonas, discordantemente sobre o Grupo Trombetas, começa a se depositar o Grupo Urupadi (formações Maecuru e Erêre) e o Grupo Curuá (formações Barreirinhas, Curiri, Oriximiná e Faro), indo até o Mississipiano. A Formação Maecuru é constituída de siltitos, arenitos e folhelhos, e a Formação Erêre, predominantemente por siltitos. O Grupo Curuá (Devoniano Superior ao Missipiano) começa com a Formação Barreirinha, constituída por folhelhos, seguidos das formações Curiri (folhelhos, diamictitos e siltitos glaciais), Oriximiná (arenitos e siltitos) e Faro (arenitos e folhelhos). Esses dois grupos foram depositados durante o segundo grande evento tectono-termal (F2) de Cunha *et al.* (1994).

Cunha *et al.* (2007), na sua atualização crono-estratigráfica da Bacia do Amazonas, propuseram a exclusão formal da Formação Faro do Grupo Curuá, e a divisão em três membros (Abacaxis, Urubu e Uraia), da Formação Barreirinha, do

mesmo grupo. Esta divisão se baseia em propriedades apresentadas nos perfis geofísicos de poços (raios gama, sônico, densidade e resistividade). O Membro Abacaxis, na base da formação, constituído por folhelhos escuros a pretos com alta radioatividade, representa o mais importante gerador de hidrocarbonetos, com matéria orgânica amorfa, do tipo II (Neves, 1989, Gonzaga *et al.* 1997).

Na Bacia do Solimões, as alternâncias entre os períodos deposicionais e erosivos foram bem mais marcantes. Sobre a Formação Jutaí, discordantemente, encontra-se o Grupo Marimari (Eiras, 1998), formado pelas formações Uerê e Jandiatuba. A primeira, do Devoniano Médio, é constituída por sedimentos argilosos de águas profundas, e a segunda, do Neo-Devoniano ao Mississipiano, por folhelhos com intercalações arenosas. A Formação Jandiatuba é litológica e cronologicamente (Neo-Frasniano ao Eo-Fameniano) semelhante à Formação Barreirinha, da Bacia do Amazonas, tendo ambas sido depositadas em ambientes anóxicos, e contendo, em sua parte basal, uma seção radioativa rica em carbono orgânico. O poço 1-JD-1-AM (produtor sub-comercial de gás – localização: -5.59859 / -70.02212, a oeste da área estudada), perfurou 70m da seção radioativa, com teor médio de carbono orgânico de 5%, chegando a 8% (Brazil, 1989).

Durante o Mississipiano Médio, na Bacia do Solimões, e Missipiano Superior, na Bacia do Amazonas, o mar retira-se, começando um grande período erosivo, em condições desérticas de clima quente, com sedimentação flúvio-deltaica e eólica, após o que, o mar reaparece (início do Pensilvaniano), com sedimentação de águas rasas, ultrapassando o Arco Purus e ligando as duas bacias. Na do Amazonas, este novo pacote sedimentar é conhecido como Grupo Tapajós (Pensilvaniano ao Permiano), de ambiente fluvial ou marinho raso a restrito, iniciando pela Formação Monte Alegre (sedimentos siliciclásticos com conglomerado basal e flúvio-eólicos com intercalações carbonáticas, siltes e argilas), seguidos da Formação Itaituba (calcários fossilíferos, evaporitos e arenitos), Nova Olinda (essencialmente evaporítica, com sal e anidrita, alternados com folhelhos, siltitos e calcários), e Formação Andirá (siliciclásticos, raros evaporitos e folhelhos). A Formação Nova Olinda foi descoberta em 1954 quando da perfuração do poço Nova Olinda 01, que atravessou 1200 m de sal gema, anidrita e gipsita, cortados por inúmeros diques e

soleiras de diabásio (Lockzy, 1966). Cunha *et al.* (2007), propuseram a divisão desta formação nos membros Fazendinha (basal), com folhelhos, carbonatos, anidritas, halitas e, localmente, silvitas, de grande interesse econômico, por se tratar de cloreto de potássio, e Arari (superior), depositado em ambiente fortemente regressivo, com ausência de carbonatos e associação de folhelhos e siltitos com halitas cristaloblásticas.

Na Bacia do Solimões, depósitos correlatos à Formação Monte Alegre são conhecidos como Formação Juruá. Em seguida vem a Formação Caruari (calcários, siltitos e intercalações salíferas), sotoposta à Formação Fonte Boa (siltitos). As formações Monte Alegre e sua correspondente Juruá constituem os melhores reservatórios nessas bacias. Estes fatos mostram que, durante a deposição do Grupo Tapajós, quando houve a ligação entre as duas bacias, predominava um clima quente e seco. Esta etapa corresponde ao evento F3 de Cunha *et al.* (1994), sendo o hiato erosivo maior na Bacia do Solimões, onde não se encontram representações sedimentares desde o início do Eo-Permiano.

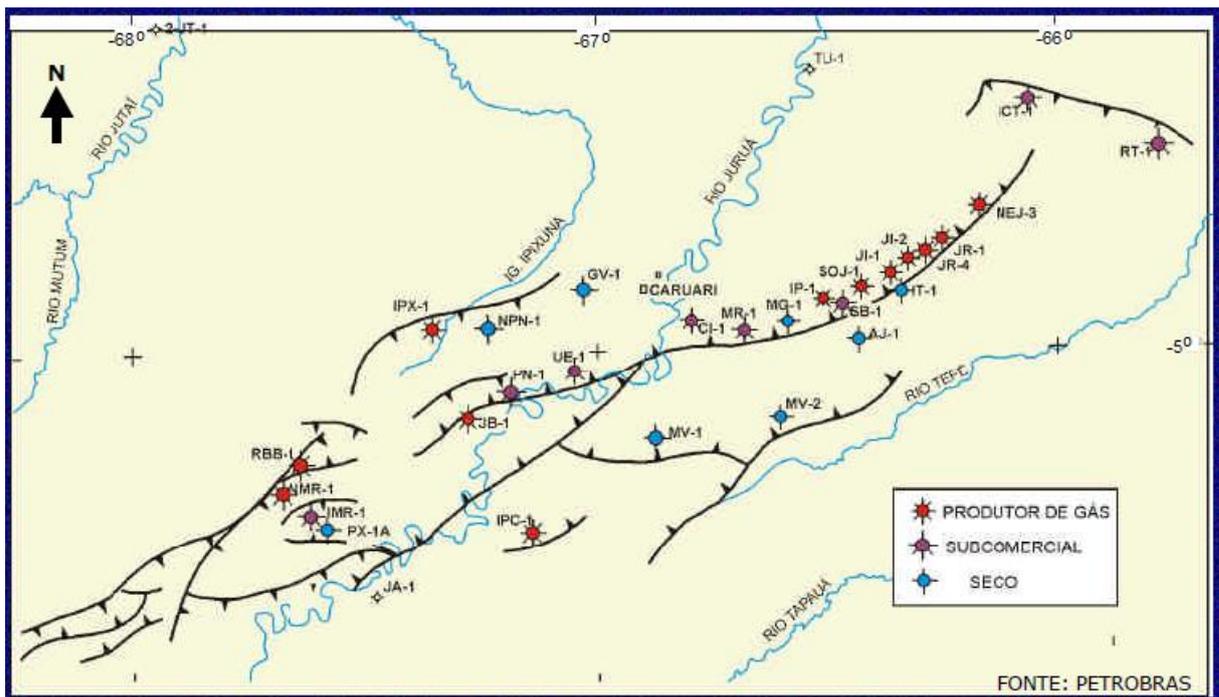
Não há registros de sedimentação no intervalo do Triássico ao Cretáceo Médio, nas bacias do Solimões e do Amazonas, as quais passaram por um grande período de ascensão e erosão. No final do Triássico e início do Jurássico, o grande evento magmático que precedeu à ruptura do Gondwana se fez representar na região através do magmatismo Penatecaua (Issler *et al.* 1974), em forma de diques e soleiras. Pelo menos três, ou em alguns locais, quatro níveis de soleiras, são reconhecidos intrudindo a seqüência permo-carbonífera. No Cretáceo Superior, um novo ciclo de subsidência é representado pela Formação Altér do Chão, com depósitos fluviais de água doce e clásticos de granulação grosseira.

Durante este período de ascensão (*upsidência*, como informalmente denominou o Prof. Garry Karner, em palestra na COPPE, UFRJ, 2008), começa a quarta etapa, conhecida como Reativação Wealdeniana, Estágio de Reativação, ou ainda, como prefere o Professor Almeida, Reativação Meso-Cenozóica (Zalán, 2004), com duração do final do Jurássico ao Quaternário. A intensidade do tectonismo vai diminuindo ao longo do tempo, sendo muito **forte** na fase inicial, com

eventos compressoriais nas bacias do Acre, Solimões e Amazonas (Orogenia Juruá), passando a **moderada**, do final do Cretáceo Inferior ao final do Eoceno, **atenuada**, do Oligoceno ao Plioceno, passando a **quiescente**, no Quaternário. Recentemente, vários autores, entre os quais Silva (2005) e Almeida Filho e Miranda (2007), têm trazido fortes evidências de reativações neo-tectônicas na região. Mesmo não sendo o foco desta tese, foi observado, durante a interpretação dos dados aeromagnéticos, um forte controle do curso do Rio Solimões-Amazonas, com lineamentos magnéticos profundos, provenientes de estruturas do embasamento cristalino, ou de soleiras dobradas e falhadas durante a Orogenia Juruá. Este controle que se propaga por todo pacote sedimentar, inclusive nos sedimentos inconsolidados da Formação Solimões, é mais uma evidência de neotectonismo atuante na região.

Na Bacia do Solimões, como resultado do detalhamento sísmico, Caputo e Silva (1990) identificaram o denominado “Megacisalhamento do Solimões”, constituído por uma zona de falhas transcorrentes, escalonadas, com direção ENE-WSW, à qual, estão subordinados, de oeste para leste, todos com direção NE-SW, os *trends* Jandiatuba, Jutaí, Ipixuna, Juruá e Urucu (Apoluceno Neto e Tsubone 1988). Este megacisalhamento é posterior à intrusão dos diques e soleiras, e é anterior à deposição da Formação Alter do Chão, sendo responsável pela formação das trapas aprisionadoras de óleo/gás.

A Figura 2.8 mostra um dos *trends* estruturais associados, formadores das trapas armazenadoras de óleo e gás na Bacia do Solimões, publicado pela ANP, segundo Caputo e Silva (1990). Observou-se uma boa correlação entre essas tendências e os lineamentos magnéticos que serão apresentados adiante (Capítulo 6 – Interpretação dos dados).



ANP - IV Rodada de Licitações (2002)

Caputo e Silva (1990)

Figura 2.8 - Detalhe estrutural do *trend* do Juruá.

2.3 – O Arco Purus

Morales (1959), baseado em dados de perfuração e de sísmica refração obtidos pela Petrobras, no período de 1954 a 1959, foi o primeiro a descrever três arcos regionais unindo os escudos das Guianas e Brasileiro, cortando o que ele denominava “fossa amazônica” (Loczy, 1966). Esses arcos de oeste para leste foram assim designados:

1 – Divisor de Iquitos (ou Arco de Iquitos) é o arco mais ocidental, evidenciado por refração sísmica e trabalhos de gravimetria. Separa a “fossa amazônica” da Bacia do Acre.

2 – Arco de Purus (ou Arco Purus), evidenciado por perfurações que não mostram, na região, sedimentos silurianos ou devonianos, mas sim calcários do Carbonífero Superior assentados diretamente sobre o embasamento. O arqueamento é bem suave, não tendo sido evidenciado pelos métodos gravimétricos ou magnetométricos.

3 – Arco de Gurupá, o mais oriental, separando a “fossa amazônica” do “gráben” de Marajó. O flanco oriental dessa estrutura sofreu um deslocamento tectônico de cerca de 2 km.

Com o desenvolvimento dos trabalhos exploratórios, a “fossa amazônica” foi dividida nas bacias do Alto, Médio e Baixo Amazonas. A Bacia do Alto Amazonas passou a denominar-se Bacia do Solimões por sugestão de Caputo (1984), ficando o termo Bacia do Amazonas reservado para as antigas bacias do Médio e Baixo Amazonas. Segundo as concepções atuais, seguidas neste trabalho, o Arco de Iquitos separa as bacias do Acre e do Solimões, o Arco Purus separa esta da Bacia do Amazonas e o Arco de Gurupá, separa esta da Bacia de Marajó. Na Bacia do Solimões, foi definido posteriormente o Arco de Carauari, discriminando duas sub-bacias: a de Jandiatuba, a oeste e a do Juruá, a leste. Na Bacia do Amazonas, é conhecido, desde longa data (Katzner, 1933), o Domo ou Arco de Monte Alegre.

Na Bacia do Solimões e na parte oeste da Bacia do Amazonas, as formações paleozóicas não afloram, sendo toda história geológica reconstituída a partir de análises petrográficas e geoquímicas aliadas a interpretações geofísicas. O embasamento sobre o qual se assenta o pacote paleozóico na área do Arco Purus, confirmado pelas perfurações que o atingiram, é constituído por rochas proterozóicas do Grupo Purus, formado por arenitos e argilitos “siltstones” da Formação Prosperança ou folhelhos e calcários da Formação Acari (Caputo e Silva 1990). Veremos adiante, ainda neste capítulo, que os furos 02-PUST-01 (perfil AA’ – Figura 3.2) e 02-SLST-01 (perfil DA’ – Figura 3.3), sobre o arco, atingiram o Grupo Purus a 1141 m e 980 m, respectivamente. Em direção a oeste, já na região da Bacia do Solimões, alguns poços atingiram rochas do embasamento gnáissico (Província Rio Negro – Juruena).

2.4 – Magmatismo e sistemas petrolíferos Jandiatuba-Juruá (!) e Barreirinha-Curiri (!)

Tanto a bacia do Amazonas como a do Solimões apresentam uma forte contribuição de atividades magmáticas, que, de alguma forma, estão relacionadas a regimes distensionais da litosfera (McKenzie e Bickle, 1988). A influência destas atividades na dinâmica dos sistemas petrolíferos provoca uma modificação na estrutura termo-mecânica das bacias, contribuindo para maturação ou senilização de rochas geradoras ou craqueamento de depósitos de gás/óleo já existentes. Atua também na migração e formação (ou destruição) de trapas e na modificação ou criação de espaços porosos. Pode-se dizer, entretanto, que a geração de hidrocarbonetos a partir de pequenos corpos ígneos não é tradicionalmente considerada como integrante do sistema petrolífero, principalmente devido ao pequeno volume de petróleo formado (Oliveira, 2005). Por outro lado, sua contribuição não pode ser descartada, como mostram Eiras e Wanderley Filho (2003), citando vários casos em todo o mundo, por eles denominados “sistemas petrolíferos ígneo-sedimentares”.

Só recentemente o mecanismo das intrusões ígneas em bacias sedimentares vem recebendo estudos mais aprofundados, no que se refere a suas implicações para a formação de jazimentos petrolíferos. No Brasil, além do trabalho acima citado, destacam-se Wanderley Filho *et al.* (2006) e Thomaz Filho *et al.* (2008). Estes últimos, baseados em Mizusaki *et al.* (1998), trazem um interessante histograma (Figura 2.9) referente ao resultado de datações geocronológicas pelo método K/Ar, realizadas em 377 amostras de basalto ou diabásio das bacias sedimentares brasileiras. Neste diagrama, claramente se destacam dois grandes episódios, no Triássico e Jurássico, bem representados nas bacias do Solimões e do Amazonas. Na Bacia do Parnaíba, além destes episódios, está presente também o ocorrido no Neocomiano. Na Bacia do Paraná, este último evento é o que ocorre de forma mais intensa. Três outros picos são mostrados ainda na Figura 2.9, sendo o do Santoniano/Turoniano, associado, segundo aqueles autores, à separação definitiva dos continentes africano e sul-americano. O pico assinalado como do Eoceno

corresponde ao grande magmatismo que afetou a margem sudeste brasileira, na região de Cabo Frio, e no Arquipélago dos Abrolhos, e o do Oligoceno mostra que a ação dos “hot-spots” tem sido contínua durante a deriva continental em curso.

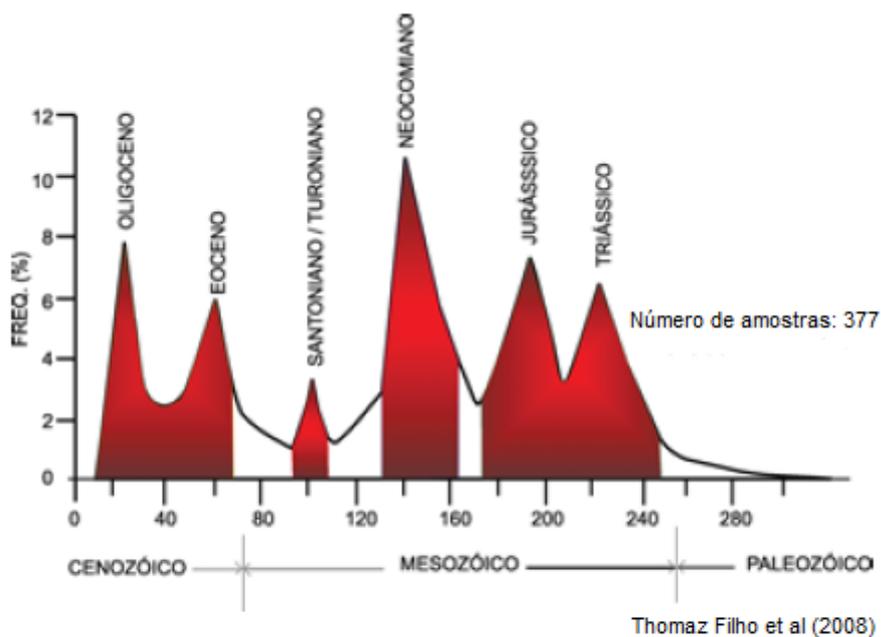
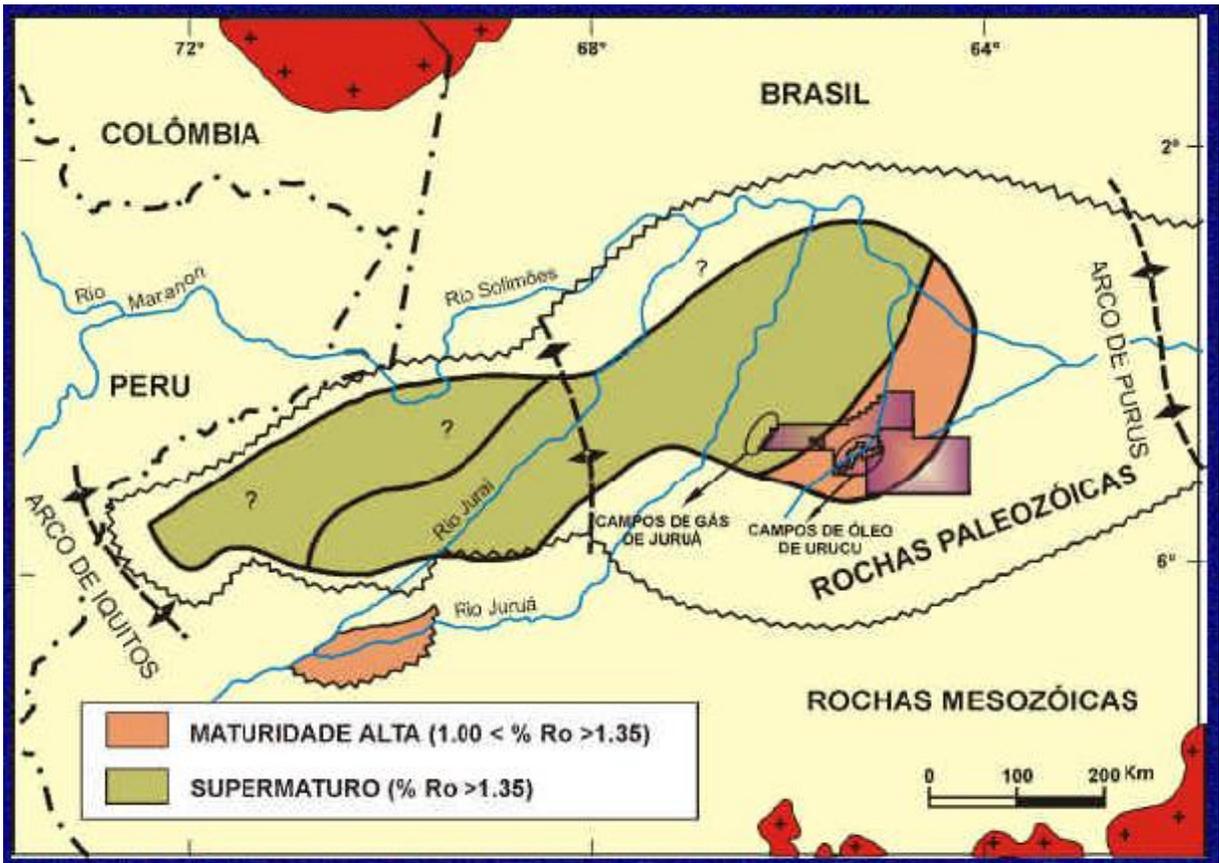


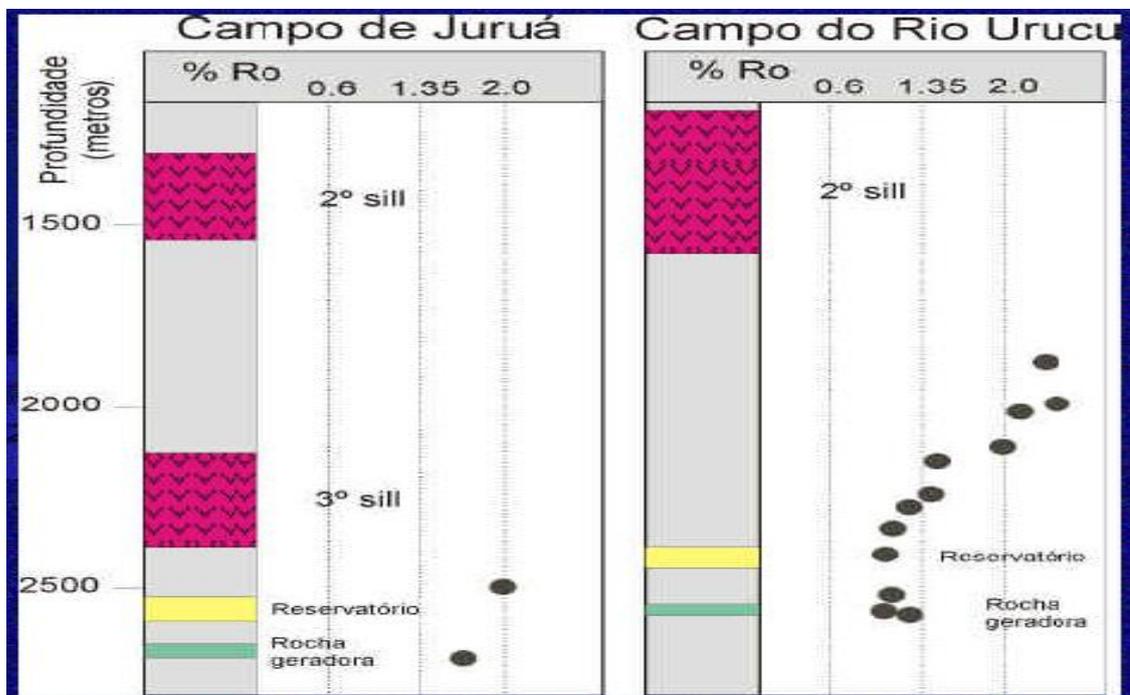
Figura 2.9 - Distribuição percentual cronológica (K/Ar) baseada em 377 amostras de basalto/diabásio que ocorrem nas bacias sedimentares brasileiras.

Caputo e Silva (1990) mostraram que o magmatismo juro-triássico que afetou a região amazônica senilizou as rochas geradoras na sub-bacia de Jandiatuba e na parte oriental da sub-bacia do Juruá, forneceu a temperatura necessária para redução de sulfato e oxidação de hidrocarbonetos, para a geração de gás sulfídrico. Provavelmente, foi também a fonte do gás hélio encontrado em poços do lineamento do Juruá e Alto de Caruari (Prinzhofer *et al.* 2002). Na área do Juruá, onde as soleiras ocorrem próximas à seção geradora (200 m estratigraficamente acima), a matéria orgânica apresenta-se senil. Já na área de Urucu, onde elas estão mais distantes (800 m), a matéria orgânica permanece na janela de preservação de óleo (Brazil, 1989). As figuras 2.10 e 2.11, disponibilizadas pela ANP para a quarta rodada de licitações, ilustram estas situações.



Mello et al. 1994

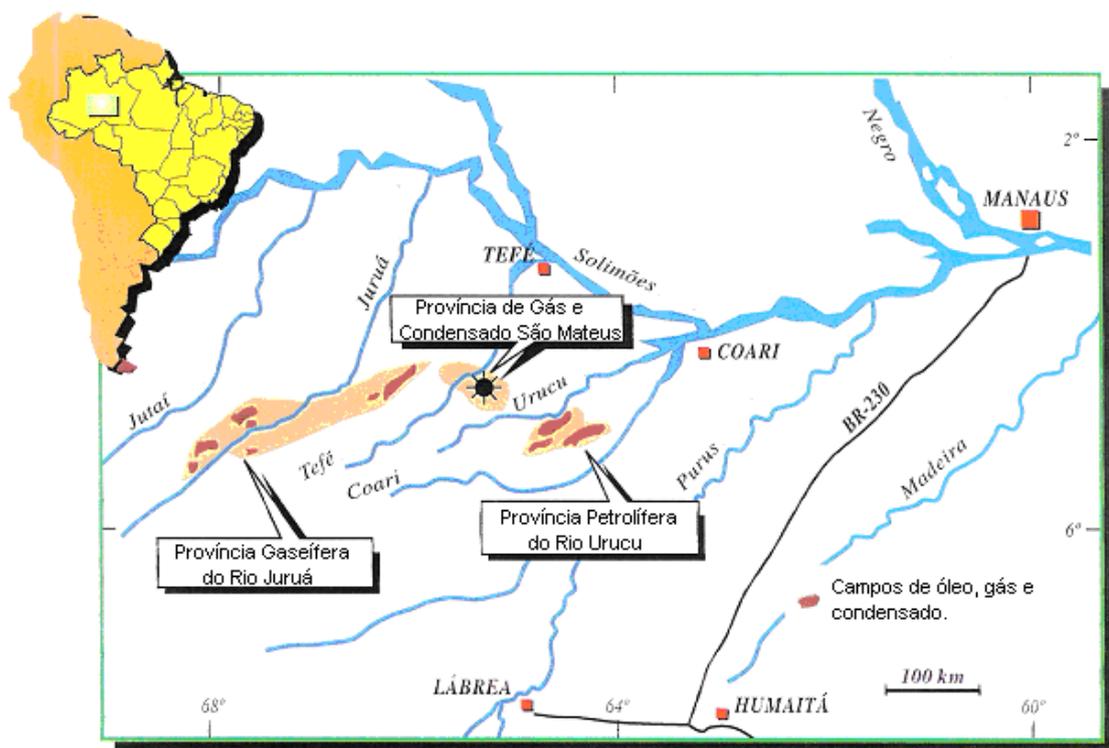
Figura 2.10 - Bacia do Solimões - maturação da Formação Jandiatura.



Mello et al. 1994

Figura 2.11 - Bacia do Solimões - Influência da terceira soleira no grau de maturação da matéria orgânica

A Figura 2.12, mais regional, é bem ilustrativa do posicionamento da Província Petrolífera do Rio Urucu, seguindo-se para oeste, a Província de Gás e Condensado de São Mateus e a Província Gaseífera do Juruá, todas na região produtora na Bacia do Solimões, Estado do Amazonas.



Modificado de Milani e Zalan, (1998).

Figura 2.12 - Região produtora da Bacia do Solimões.

A Bacia do Amazonas, com uma coluna sedimentar da ordem de 6 km, apresenta um forte potencial gerador, conforme atestam os dados geoquímicos já analisados, mas só recentemente (década de 2000), descobriram-se reservas comerciais (Campos de Azulão e Japiim). Os resultados do modelamento quantitativo realizado na bacia indicaram, no entanto, que não houve nenhum evento termal significativo, ao nível regional, para formação e preservação de grandes ocorrências de óleo ou gás associado com o magmatismo Penatecaua (Gonzaga *et al.*, 2000). Segundo esses autores, o calor trazido pelos corpos intrusivos provocou a vaporização da água contida nos poros das encaixantes, desidratação, descarbonização e, conseqüentemente, diminuição do teor de carbono nas rochas

geradoras. Concluíram ainda que vários fatores, como profundidade e espessura da intrusão, diferença de temperatura com a encaixante, mineralogia dos fluidos e da encaixante, entre outros, são decisivos para o resultado final, sendo que os efeitos sobre as encaixantes são proporcionais à espessura dos corpos intrusivos, podendo ser potencializados no caso de intrusões múltiplas.

Na Bacia do Amazonas, as formações Pitinga, Barreirinha e Curiri são as únicas com potencial gerador significativo.

Gonzaga *et al.* (2000), mostram que na Formação Pitinga predomina o querogênio tipo II. Na Formação Barreirinha predomina o tipo II na base (folhelho preto radioativo com 3 a 5% de TOC e S2 de 5 a 20mg HC/g da rocha) e tipo III na parte superior (folhelho cinza escuro). A Formação Curiri tem preponderância do querogênio tipo III (baixo TOC de 1 a 2% e baixo S2 de até 3mg HC/g da rocha).

A parte inferior da Formação Barreirinha é, de longe, a melhor geradora da bacia. Gonzaga *et al.* (2000) notaram ainda que, nos flancos norte e sul da bacia, bem como em sua parte oeste (região do Arco Purus), onde a seção é rasa (1500 m), a maturação é baixa (< 0,65% Ro). Na parte central (4000 m), os valores de Ro chegam a 1% e os gradientes extrapolados a partir de poços sugerem que cheguem de 1,3 a 1,4% no depocentro. Valores de Ro > 1,4% são devidos a efeitos térmicos dos diques ou soleiras de diabásio. Concluem, assim, os citados autores, que a evolução térmica da Bacia do Amazonas foi controlada principalmente pela subsidência e que as intrusões ígneas tiveram papel importante apenas nas áreas onde intrudiram rochas devonianas (nas proximidades ou na própria geradora). A Figura 2.13, mostra as principais ocorrências de óleo e gás sobre o esboço estrutural da Bacia do Amazonas, conforme Milani e Zalan (1998).

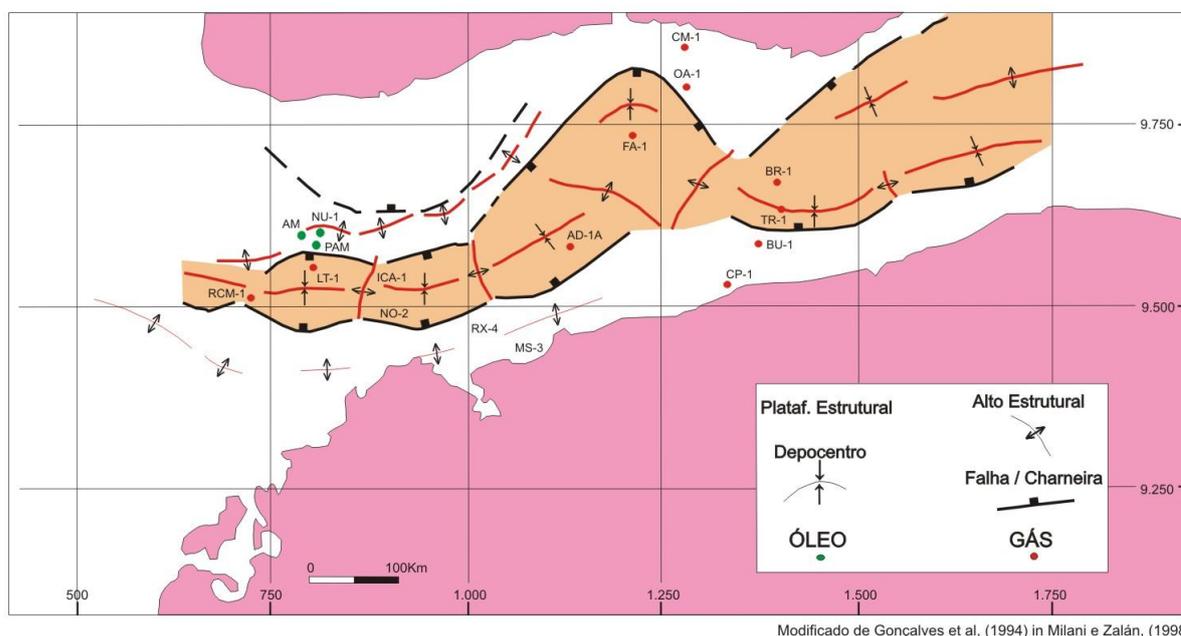


Figura 2.13 - Esboço estrutural da Bacia do Amazonas, com localização das principais ocorrências de óleo e gás.

Sumariando, na Bacia do Solimões, o sistema petrolífero Jandiatuba-Juruá(!) teve o seu pico de geração, expulsão e migração no Triássico Superior-Jurássico Inferior, concomitante com o magmatismo Penatecaua. O óleo acumulou-se, então, em antigas trapas formadas provavelmente no Pensilvaniano/Permiano (orogenia tardi-herciniana - ?). Durante a orogenia Juruá (Jurássico a início do Cretáceo), foram constituídas as melhores trapas conhecidas, havendo, então, remobilização e novo trapeamento (Milani e Zalan, 1998). A Figura 2.14, de Mello *et al.* (1994), explicita tal situação no contexto do mencionado sistema petrolífero.

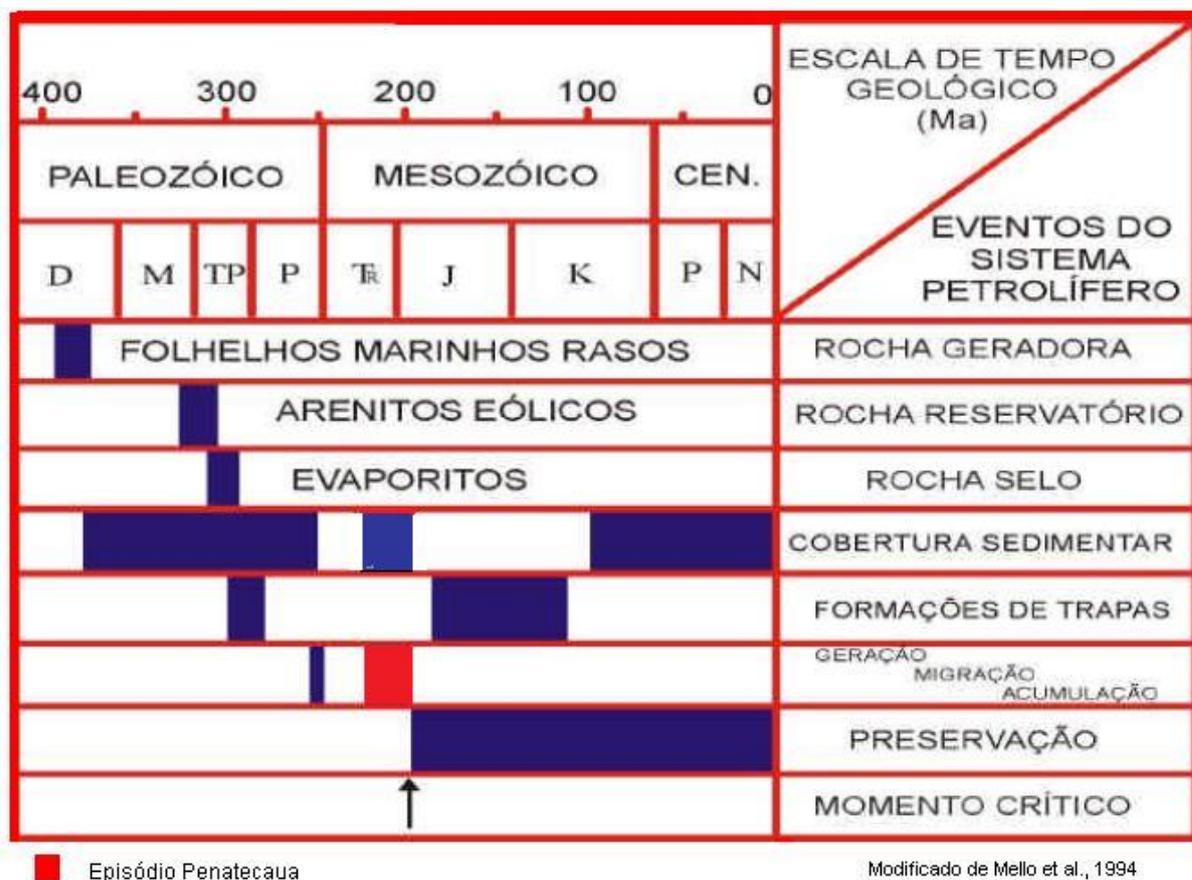


Figura 2.14 - Eventos do sistema petrolífero Jandiatura-Juruá (!).

Na Bacia do Amazonas, Gonzaga *et al.* (2000) identificaram apenas um sistema petrolífero, o Barreirinha-Curiri(!), sintetizado na Figura 2.15. Enquanto, na Bacia do Solimões, o megacisalhamento formado durante a Orogenia Juruá foi o responsável pela formação das melhores estruturas com acumulações de óleo/gás, elas praticamente inexistem na Bacia do Amazonas. O Arco Purus serviu, assim, como anteparo ou pelo menos como refrator desses esforços cisalhantes. A Formação Barreirinha, constituída por folhelhos marinhos escuros, é a principal geradora, sendo os arenitos da Formação Curiri os principais reservatórios, com os folhelhos e diamictitos intercalados, funcionando como selantes. Tanto a Formação Barreirinha como a Formação Curiri são do Devoniano Superior. O trapecamento é do tipo estratigráfico. Estes autores concluem ainda, baseados em dados geoquímicos

de maturidade do óleo (pico da geração), que as acumulações não foram originadas pelo efeito térmico das intrusivas, porém estas levaram as rochas geradoras a um estado senil. As acumulações mais importantes estão distantes da cozinha do óleo (*oil kitchen*), com indicações de migração de até 150 km. Esta grande migração, tanto horizontal quanto vertical, aliada ao grande volume de rocha geradora na cozinha do óleo (espessura de até 1000 m) levou aqueles autores a calcular um volume expelido de óleo equivalente da ordem de 1 trilhão de barris.

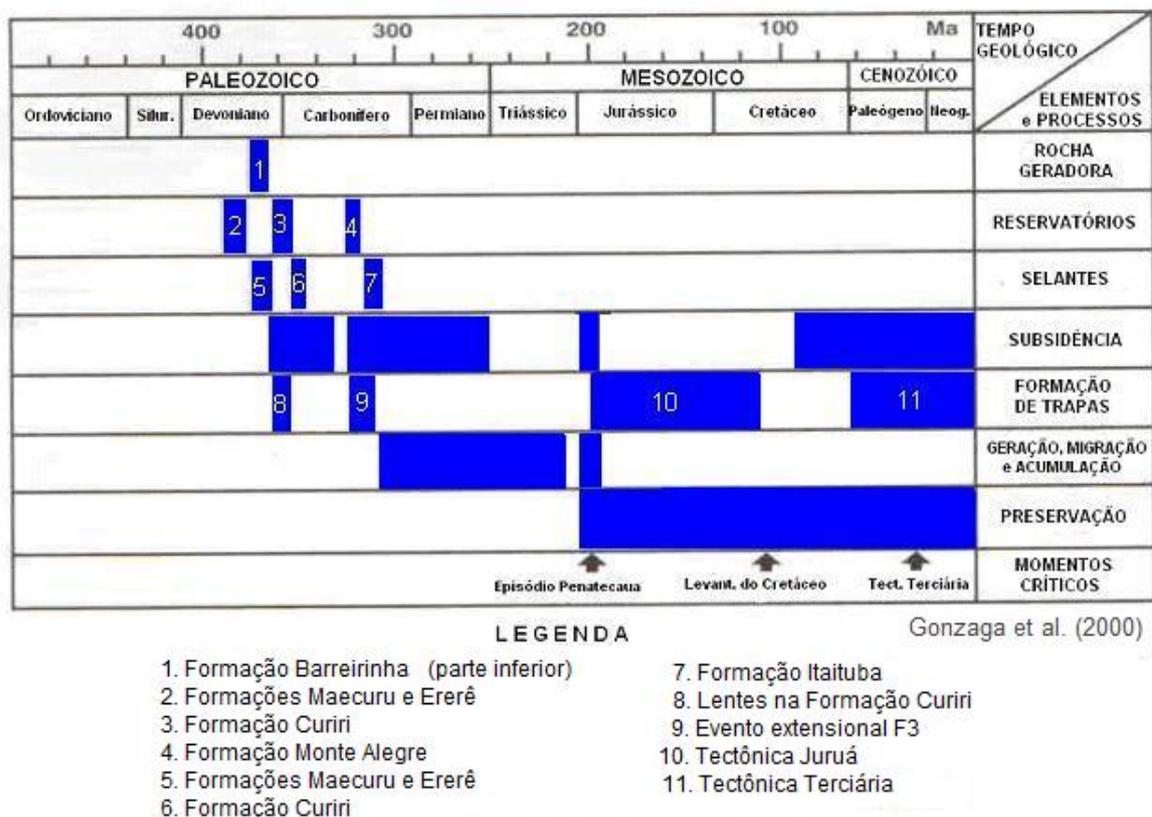


Figura 2.15 - Eventos do sistema petrolífero Barreirinha-Curiri (!).

Milani e Zalán (1998) chamam a atenção para outros tipos de trapas que devem ser investigadas, sendo as mais prováveis os blocos falhados extensionais, a tectônica salífera, além de outras ligadas a movimentos transcorrentes terciários que afetaram a parte leste da bacia.

2.5 – As intrusões ígneas nas bacias do Solimões e do Amazonas

As figuras 2.14 e 2.15 mostram, que durante o episódio magmático Penatecaua, as rochas geradoras, reservatórios e selantes já tinham sido depositadas. Parte das trapas já tinha sido formada e algum óleo tinha sido gerado (na Bacia do Amazonas, a maior parte). Essas rochas, de idade devoniana ou carbonífera, tinham ambientes tectônico e de sedimentação distintos.

Veremos adiante (item 3.2), no mapa Bouguer da Figura 3.4, na parte central da Bacia do Amazonas, uma grande anomalia positiva, já estudada por Nunn e Ayres (1988), que acompanha bem de perto o depocentro da Bacia do Amazonas. No modelamento apresentado pelos autores, é suposto um corpo com 100 a 200 km de espessura e densidade de $3,0 \text{ g/cm}^3$, estendendo-se por uns 800 km, intrudindo a crosta inferior ($\rho_{ci} = 2,85$) e parte da crosta superior ($\rho_{cs} = 2,75$). Esta densidade é compatível com rochas gabróides. No poço 1-CM-1-PA (Cuminá, próximo a Oriximiná, no Pará, fora da área de estudo), é descrita a presença de piroxenito, uma rocha ultrabásica intrusiva, com densidade de $3,1$ a $3,6 \text{ g/cm}^3$, típica do manto. Esta rocha foi datada em $570 \pm 70 \text{ Ma.}$, pela Petrobras/CENPES (Bahia e Abreu, 1985). Esses corpos intrusivos, verdadeiras câmaras magmáticas, formaram-se durante o estiramento crustal que levou à implantação das bacias paleozóicas do Solimões e do Amazonas. Na região do Arco Purus, há um grande baixo gravimétrico, assinalando a ausência desses corpos profundos, porém, na Bacia do Solimões, alguns deles voltam a aparecer de modo bem menos expressivo.

As bacias intracratônicas da Amazônia foram afetadas pelos eventos orogenéticos Famateniano (Devoniano Inferior a Médio) e Eo-herciniano (Mississipiano-Pensilvaniano), porém sem grande representatividade, a não ser pelas discordâncias erosivas e posteriores subsidências mecânicas associadas. Ver-se-á adiante (capítulo 6) que este último evento balizou a principal linha de charneira da Bacia do Solimões, no seu limite NE. Não são conhecidas, nas bacias do Solimões e do Amazonas, datações radiométricas em basaltos/diabásios relativas a esses períodos.

Por outro lado, durante a Orogênese Gondwanides, que levou à formação do Oceano Atlântico, esses processos intrusivos foram reativados com o magmatismo Penatecaua, responsável pela formação dos inúmeros diques e soleiras que afetam ambas as bacias.

Na câmara magmática, as diferenças de pressão e temperatura provocam o fenômeno de diferenciação, com a coexistência de fases sólidas e líquidas (magma). Como a rocha no estado líquido é menos densa do que no estado sólido, a parte líquida tende a ascender para regiões de menor pressão. Nessas grandes profundidades (15 a 20 km, nos modelos de Nunn e Aires, 1988), praticamente não há fendas ou espaços vazios, devido à grande pressão das rochas sobrejacentes. Supondo um suprimento constante de calor proveniente do manto (pluma mantélica), a pressão e temperatura aumentam obrigando o magma a subir. Press *et al.* (2006) citam três modos de ascensão dos magmas na crosta: 1 – Intrusão forçada ou abertura por acunhamento; 2 – Rompimento de grandes blocos de rocha; 3 – Fusão das rochas encaixantes. Como os modos 2 e 3 implicam em mudanças na composição do magma, e como não são conhecidas diferenças litológicas relevantes entre as soleiras nas duas bacias (Mizusaki *et al.* 2002; Thomaz Filho *et al.* 2008), o processo predominante foi a intrusão forçada ou abertura por acunhamento.

Os magmas basálticos têm temperaturas da ordem de 1000 a 1200 °C e são pouco viscosos, podendo, assim, se espalhar por vastas regiões. Porém, à medida que vão atingindo áreas com menores pressões e temperaturas, tornam-se mais viscosos e densos. Os sedimentos, devido aos processos diagenéticos, são mais compactos, menos porosos e mais densos quanto mais profundos se encontrarem. A interação entre as pequenas diferenças litológicas ou estruturais nos pacotes sedimentares com as diferentes pressões magmáticas dos fluidos invasores levou a diferentes cenários para intrusão dos diques e soleiras. Tais cenários, posteriormente aliados à atuação da Orogenia Juruá, muito ativa nesta bacia e quase ausente na do Amazonas, propiciaram as condições para as diferentes respostas magnéticas, objeto desta tese.

Já vimos que, na região da Bacia do Amazonas, a câmara magmática era extremamente grande e, conseqüentemente, a quantidade de calor transferida à bacia. O magma teve mais facilidade de se intrudir a grandes profundidades na forma de espessas soleiras, mesmo que isso significasse a necessidade de pressões altíssimas para soerguimento do pacote sedimentar. Nessas condições grande parte das soleiras se situou próxima das rochas geradoras e o esfriamento, ou seja, o tempo necessário para que a temperatura da rocha intrusiva quente se igualasse à da rocha encaixante foi grande o suficiente para levá-las ao estágio de senilidade. Gonzaga *et al.* (2000) mostram que a maior parte das ocorrências de gás nesta bacia está situada na porção centro-oriental, onde as soleiras, preferencialmente, intrudiram a seqüência devoniano-carbonífera. Na parte oriental, em direção ao Arco Purus, onde as soleiras estão mais distantes tanto das rochas geradoras como dos reservatórios, é onde se encontram as ocorrências de óleo, e as raras ocorrências de gás (duas), aí existentes, são devidas a efeitos termais locais dos diques de diabásio (Figura 2.13).

Na Bacia do Solimões, a fonte supridora das soleiras não foi tão imponente em tamanho e quantidade de calor. A bacia era menos profunda e as intrusões se deram preferencialmente na seqüência evaporítica. Na Figura 2.5, observam-se três níveis principais de soleiras na região da Província Gaseífera do Juruá e dois níveis (os mais superiores) na Província do Urucu. Como a bacia é pouco profunda, o calor suprido pelas soleiras foi fundamental na formação do óleo em Urucu e do gás no Juruá. Ademais, como mostram Wanderley Filho *et al.* (2006), os arenitos nas proximidades de soleiras podem mais facilmente se fraturar, aumentando a porosidade e formando melhores reservatórios. Outro fator importante que torna a Bacia do Solimões atraente para investimentos na área do petróleo é a presença do tectonismo Juruá, que propiciou a formação de novas trapas, migração e possível concentração de óleo e gás para essas trapas.

Desse modo, a presença das soleiras na Bacia do Solimões foi altamente benéfica, no que se refere à geração e migração dos hidrocarbonetos. Eiras e Wanderley Filho (2003) calculam um volume *in place* de óleo equivalente da ordem de 900 milhões de barris. Citando a modelagem geoquímica de Bender *et al.* (2001),

tais autores afirmam que este seja, talvez, um caso único no mundo da geração de quantidades tão grandes de petróleo formado pelo efeito térmico de rochas magmáticas.

No que se refere à pesquisa exploratória, entretanto, a detecção das trapas através dos métodos sísmicos fica bastante prejudicada, pois são conhecidos os problemas da alta impedância acústica dos diabásios, diminuindo o poder de penetração das ondas sísmicas e gerando falsas estruturas. Para que se tenha seções migradas de melhor qualidade, se faz necessário o conhecimento prévio da localização desses corpos ígneos, e esta tese, mesmo trabalhando com dados magnéticos antigos e de baixa qualidade para os padrões atuais, veio mostrar que uma grande contribuição pode ser obtida.

Deve ainda ser registrado que, Prinzhofer *et al.* (2002) notaram a presença anômala de gases nobres escapando de diabásios fraturados do Campo do Rio Urucu, na Bacia do Solimões, o que pode trazer novas perspectivas econômicas na exploração.

Capítulo 3

Dados Utilizados

Os dados utilizados nesta tese são todos públicos, adquiridos pela Petrobras e atualmente gerenciados pela ANP – Agência Nacional do Petróleo, Gás Natural e Biocombustíveis, que os cedeu para o desenvolvimento da pesquisa. Compõem-se de dois grupos: dados aeromagnetométricos e dados gravimétricos, ambos em formato GDB (*Geosoft Data Bank*), os quais foram analisados, reprocessados e interpretados. Além desses, utilizou-se dados de poços, com os quais elaboramos perfis geológicos, como apoio às interpretações geofísicas. Ressalte-se que há um grande número de poços já perfurados, especialmente na Bacia do Solimões, porém os dados culturais públicos são escassos, estando a grande maioria em fase de depuração.

3.1 – Dados de poços

Foram elaborados 6 perfis geológicos, a partir da descrição de 21 furos de sondagem. A localização dos mesmos está na Figura 3.1 e a visualização de cada deles, nas Figuras 3.2 e 3.3.

O perfil A-A' é o único longitudinal, com direção W-E, cruzando o Arco Purus (Figura 3.2). Os poços 1-JOB-01, 1-NSM-01 e 1-RA-02, na Bacia do Solimões encontraram rochas do Devoniano (Grupo Marimari) a pouco mais que 3 km de profundidade, diretamente sobre o embasamento cristalino. Os poços 1-IA-01 e 2-PUST-01, bem mais rasos, já sobre o Arco Purus, encontraram rochas do grupo homônimo em contato direto com a seqüência permo-carbonífera. Já os furos da parte leste da seção (2-IPST-01 e 2-AAST-01), mesmo não sendo tão profundos, cortaram toda a seqüência paleozóica. O último deles encontrou rochas do Grupo Purus (Pre-Cambriano Superior) e realçou o forte mergulho para leste, em direção ao depocentro da Bacia do Amazonas. Observa-se também que as soleiras são mais abundantes e menos espessas na região da Bacia do Solimões que na do

Amazonas. Os dois furos sobre o Arco Purus mostraram pequena participação desses corpos básicos.

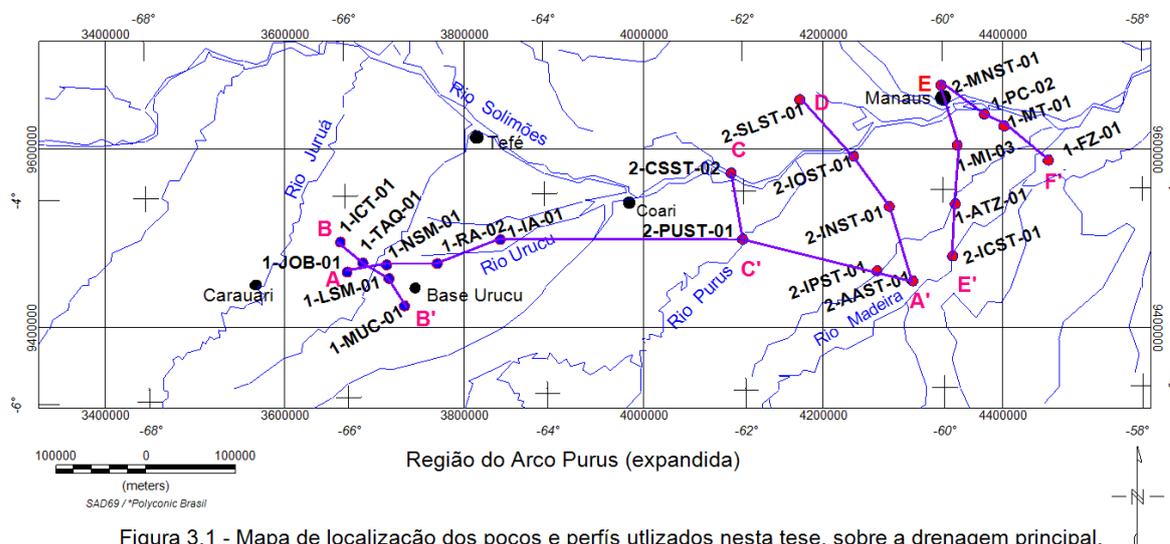


Figura 3.1 - Mapa de localização dos poços e perfis utilizados nesta tese, sobre a drenagem principal.

Enquanto o Arco Purus tem uma orientação geral N-S, as rochas do embasamento subjacente, como mostrado pelos dados magnéticos, apresentam feições tectônicas com uma orientação preferencial para NE-SW ou mesmo E-W. Esse tectonismo permaneceu atuante durante o Paleozóico, formando diversos *grábens* estreitos e alongados nessas direções, os quais foram reativados no Mesozóico, durante a Orogenia Juruá. Os perfis B-B', D-A' e E-E' ilustram bem a existência desses *grábens*.

O perfil B-B' com direção NW-SE, situa-se na bacia do Solimões (Figura 3.2). Os dois furos em suas extremidades, 1-ICT-01 e 1-MUC-01, atingiram o embasamento cristalino, porém estão ausentes as seqüências paleozóicas mais antigas, preservadas na região central do *gráben*, como mostram os furos 1-TAQ-01 e 1-LSM-01.

Legenda dos Perfis

	F4 – (Cretáceo a Recente) – F. Solimões e Alter do Chão	(T-K)
	(Triássico - Jurássico) – Magmatismo Penatecaua	(Soleira)
	F3 – (Pensilvaniano-Permiano) – Gr. Tefé – Gr. Tapajós	(P-C)
	S2/F2 – (Devoniano-Missipiano) – Gr. Mari Mari e Curuá/Urupadi	(C-D)
	S1/F1 – (Ordoviciano sup. a Devoniano inf.) – F. Jutai e Gr. Trombetas	(D-S)
	Grupo Purus – (Pré-Cambriano sup.) – F. Prosperança	(pCs)
	Embasamento Cristalino – (Pré-Cambriano indiviso)	(pCi)

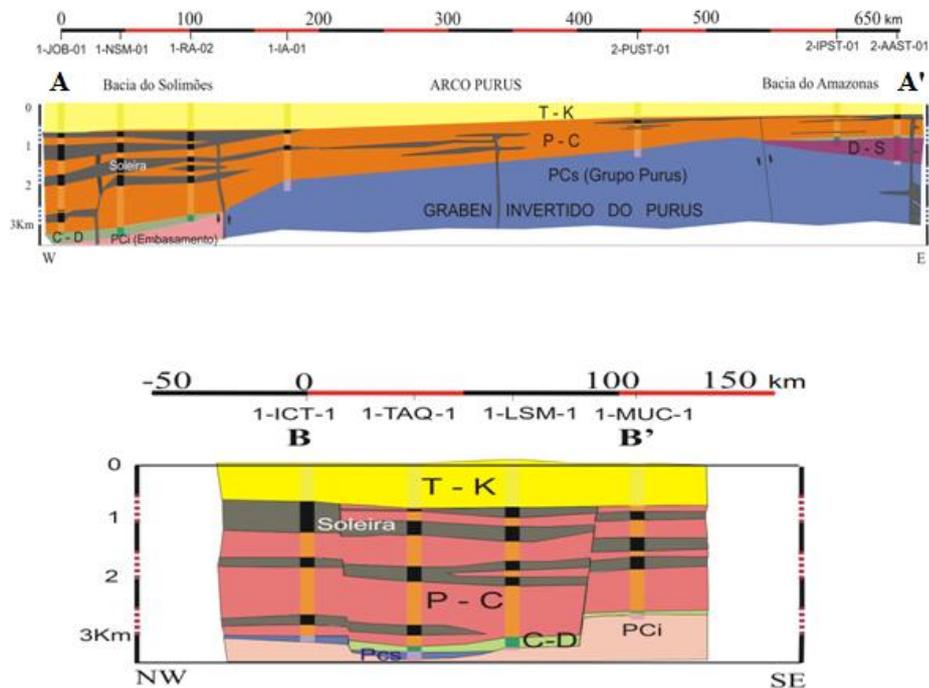


Figura 3.2 – Legenda e perfis A - A' e B - B'.

O perfil C-C' tem direção N-S e está na região do Arco Purus (Figura 3.3). O furo 2-PUST-01 encontrou a Formação Prosperança (Grupo Purus) a -1138 m de profundidade, diretamente sob rochas permo-carboníferas (mega-seqüência F3), e o furo 2-CSST-02, mais a norte, após a mega-seqüência F3, na cota -1253 m, encontrou a seqüência F1 (faltando completamente a F2), cortando 250 m desta, até encontrar o Grupo Purus. Esse comportamento se deve à presença freqüente desses *grábens*, já citados, com direção E-W a NE-SW.

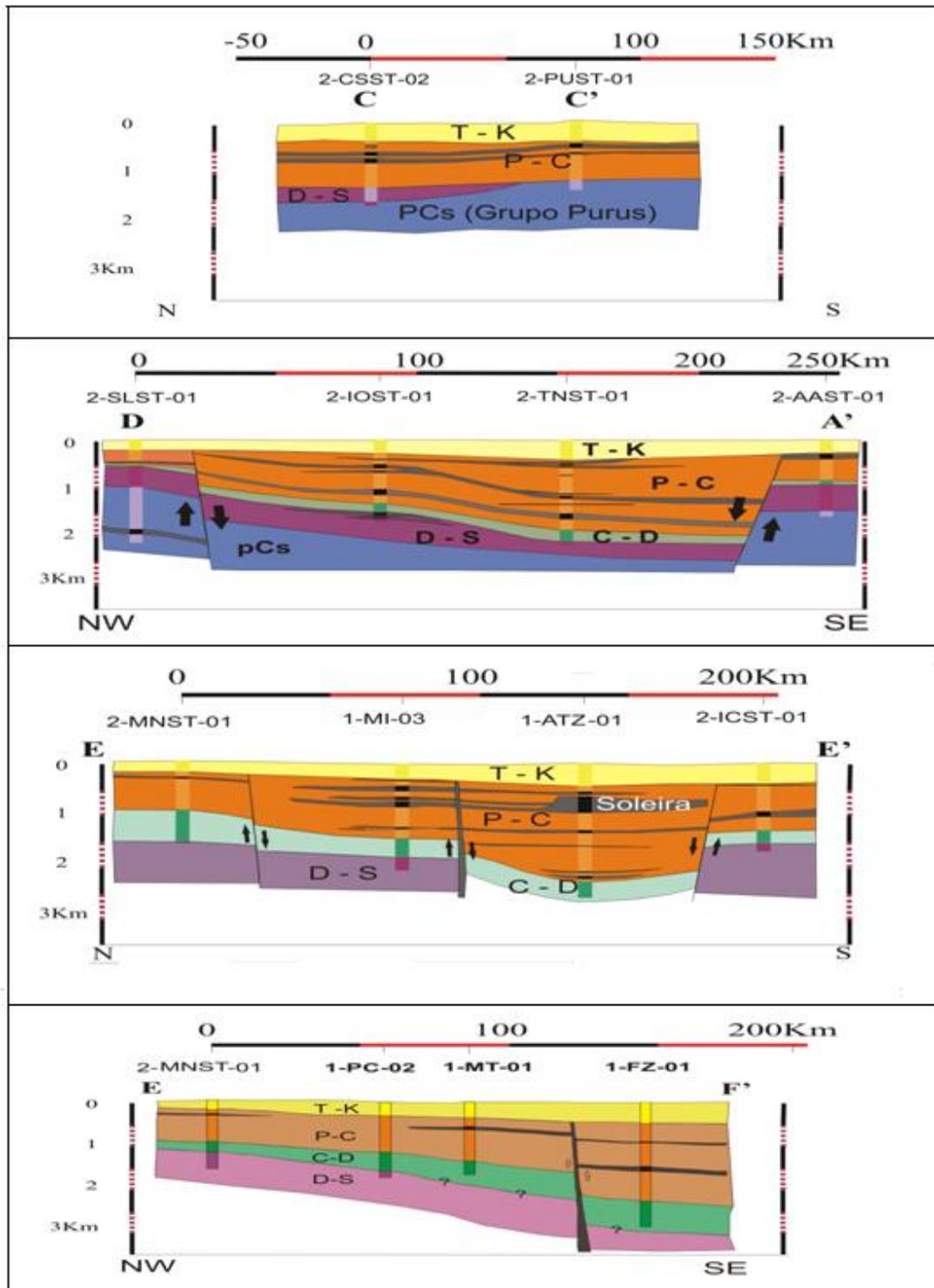


Figura 3.3 - Perfis C - C', D - A', E - E' e E - F'.

Os perfis D-A' e E-E' (Figura 3.3), são muito semelhantes, mostrando mergulhos regionais para S e SE em direção ao depocentro da Bacia do Amazonas. No perfil D-A' a seção paleozóica é mais preservada na região central do *gráben*. No E-E', com furos mais rasos, não foram atingidas representações do Grupo Purus. O

perfil E-F', de modo semelhante, não atingiu rochas desse grupo e sua simplificação em relação ao perfil E-E' se deve ao seu posicionamento NW-SE, mais próximo da direção estrutural que controla esses *grábens*.

3.2 – Dados gravimétricos

Os dados gravimétricos foram fornecidos no arquivo “dexnor.gdb”, que abrange todos os dados de gravimetria terrestre da área do antigo DEXNOR – Distrito de Exploração da Região Norte da Petrobras, se estendendo desde o Acre, passando por toda região do vale do Solimões-Amazonas, região bragantina no Pará e estados do Maranhão e Piauí, totalizando 194.655 pontos.

A Figura 3.4 apresenta o Mapa Bouguer obtido com esses dados. Sobre ele, foram colocados os limites dos quatro projetos aeromagnéticos estudados, para uma melhor compreensão da interpretação estrutural que será apresentada no capítulo 6.

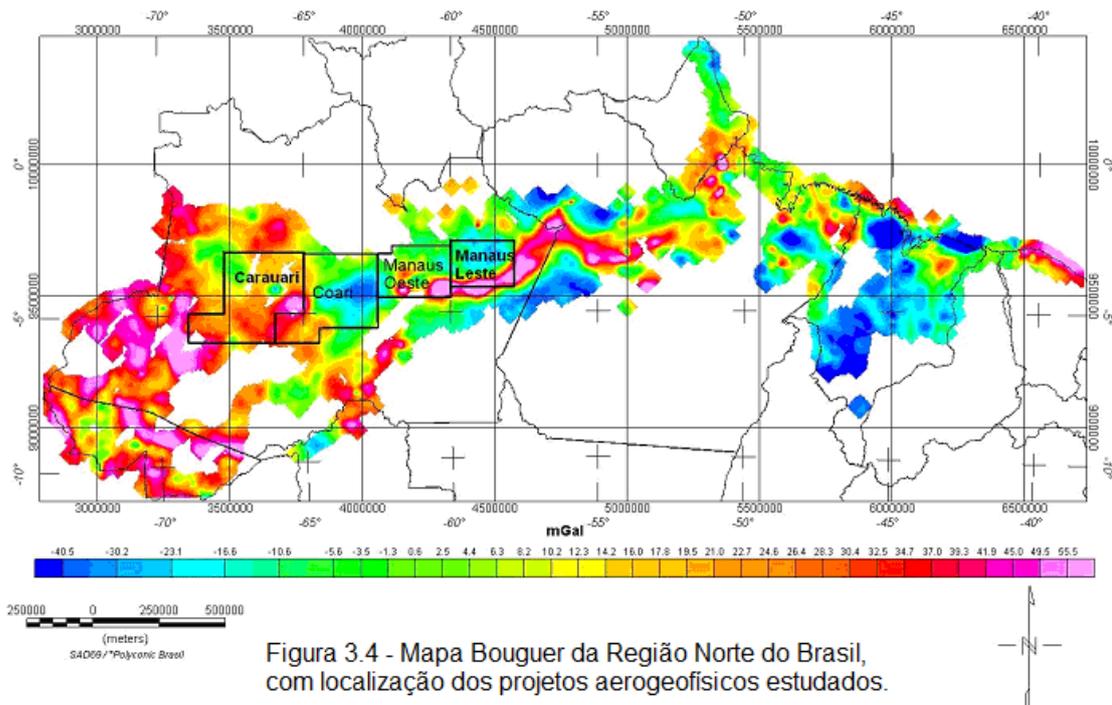


Figura 3.4 - Mapa Bouguer da Região Norte do Brasil, com localização dos projetos aerogeofísicos estudados.

A aquisição foi feita por equipes próprias da Petrobras. Na região em estudo, o trabalho constou de amostragens ao longo dos principais rios, com exceção de uma pequena área próxima a Manaus, que, devido à maior facilidade de acesso, permitiu uma amostragem em malha regular. Utilizou-se ainda dados de satélite do Projeto Topex (*Topography Experiment*) fornecidos pela Universidade da Califórnia em San Diego (http://topex.ucsd.cdu/cgi-bin/get_data.cgi), como também do GRACE (*Gravity Recovery and Climate Experiment*), disponibilizados pela Geosoft/Oasis-Montaj. Este último, na realidade, trata-se de dois satélites, separados de 220 km, girando na mesma órbita e mutuamente imageados por um feixe de raios laser, permitindo a medição de pequenas variações do campo gravitacional terrestre. Devido às suas características de aquisição, e principalmente às grandes distâncias entre o sensor e as fontes causadoras, os dados gravimétricos obtidos com satélites fornecem apenas informações em escala global (tendências). Assim, pouco acrescentaram, aos objetivos da presente dissertação, em virtude da seção geológica de interesse desta pesquisa situar-se na parte mais superior da crosta terrestre.

A análise regional serviu como apoio às considerações já efetuadas com foco na geologia estrutural. Os processamentos detiveram-se mais especificamente na região do Arco Purus, coincidente com a área dos projetos aeromagnéticos estudados. Quanto à gravimetria terrestre, a pequena densidade de amostragem, especialmente na região da Bacia do Solimões (vide Figura 4.1, no próximo capítulo), não permitiu uma interpretação mais aprofundada dos dados.

3.3 – Dados magnetométricos

Os dados magnetométricos (ou magnéticos, para maior simplicidade), analisados e interpretados, constam de dois arquivos (projetos B e C na Figura 1.2) cobrindo a região do Arco Purus: Projeto Manaus Oeste (app012) e Projeto Coari (app170). Foram também estudados dois outros a eles adjacentes: Projeto Manaus Leste (app011) e Projeto Carauari (app120). Os dois últimos foram incorporados para melhor situarmos o Arco Purus e definirmos as diferenças nas assinaturas magnéticas das intrusões nas bacias do Solimões e do Amazonas. Todos

apresentaram problemas de aquisição e redução dos dados, que serão tratados no próximo capítulo. Outros projetos citados ao longo do texto não foram analisados em detalhe, mas constam apenas como referência para análises regionais ou ajustes para nivelamento.

As características dos quatro projetos de aquisição aeromagnetométrica estão listadas na Tabela 3.1, a seguir.

CARACTERÍSTICAS\PROJETOS	Carauari	Coari	Manaus W (*)	Manaus E (*)
Período de aquisição	06/81 a 03/82	02 a 08/84	10/60 a 01/61	07 a 10/57
Contratante	Petrobras	Petrobras	Petrobras	Petrobras
Contratada	Lasa / Encal	Prospec / Encal	Lasa / Prospec	Lasa
Área Total (km ²)	106.000	91.578	51.860	34.450
Total dos Perfis (km)	59.577	38.078	31.796	34.000
Altura de vôo barométrica (m)	800	800	400	400
Direção das Linhas de Vôo	N – S	N – S	N – S	N – S
Espaçamento entre as LV (km)	2,5	3	2	1,5
Direção das Linhas de Controle	E – W	E – W	E – W	E – W
Espaçamento entre as LC (km)	8	18	?	?
Intervalo de amostragem (seg)	1 (50m)	1 (50 m)	?	?
Magnetômetro	Precessão de protons	Precessão de protons	Flux Gate Mark III	Flux Gate
Sensibilidade (nT)	1	1	< 1 (?)	< 1 (?)
Período do processamento	12/81 a 11/82	09 a 11/84	02 a 04/61	11/58 a 04/59
Empresa do processamento	Lasa / Encal	Encal	Lasa / Prospec	Lasa

(*) Dados recuperados por digitalização de mapas de contorno.

Tabela 3.1 – Principais parâmetros dos levantamentos aeromagnetométricos

Utilizaram-se ainda dados do EMAG2 fornecidos pela NOAA (*National Oceanic and Atmospheric Administration*) / NGDC (*National Geophysical Data Center*), em formato de *grid*, com resolução de 2 minutos de arco.

Capítulo 4

Compatibilização, reprocessamento e integração dos dados

4.1 – Dados gravimétricos

Os dados gravimétricos, como já citado, foram obtidos ao longo dos principais rios, com diferentes espaçamentos, não obedecendo a uma malha regular. Foram referenciados ao *datum* Woolard, uma antiga rede gravimétrica mundial (Woolard, 1940), tendo sido realizadas as correções de latitude usando-se a antiga fórmula (Eq. 4.1), da gravidade internacional (Gama-30), adotada pela União Internacional de Geodésia e Geofísica em 1930 (Nettleton, 1962), como segue:

$$g_{\phi} = 978049,0 (1 + 0,0052884 \text{ sen}^2\phi - 0,0000059 \text{ sen}^2 2\phi), \quad (4.1)$$

onde g_{ϕ} é o valor da gravidade, em mGal⁽³⁾, ao nível do mar, na latitude ϕ .

Esta fórmula foi revista em 1967 (Gama-67), para o Sistema de Referência Geodético (GRS67) e, em 1971, foi publicada uma tabela com os valores atualizados de medições do valor da gravidade absoluta em vários pontos do mundo. Tal acervo forma a Rede Padrão de Gravidade Internacional (*International Gravity Standardization Net 1971*, IGSN71), que detectou um erro da ordem de 14 mGals em relação aos valores anteriormente calculados com o Gama-30.

Em 1980, com novos refinamentos nas medições gravimétricas, passou-se a adotar uma nova fórmula:

$$g_{\phi} = 978032,7 (1 + 0,0053024 \text{ sen}^2\phi - 0,0000058 \text{ sen}^2(2\phi)) . \quad (4.2)$$

Para levantamentos de pequenas áreas pode-se considerar a correção de latitude como:

(³) 1 mGal = 10⁻³ Gal = 10⁻⁵ m/seg²

$$\Delta g_{\phi} / \Delta s = 0,811 \text{ sen } 2\phi \text{ (mGal/km)}, \quad (4.3)$$

sendo Δs a diferença horizontal N-S em km. Na latitude 45° , a correção é máxima, da ordem de 0,01 mGal por 13 m. Ela é nula no equador e nos pólos.

Como os levantamentos gravimétricos foram executados principalmente nas décadas de cinquenta e sessenta, os dados fornecidos no arquivo utilizam a fórmula Gama-30. No presente reprocessamento, foi utilizada a proposta mais recente.

Os dados gravimétricos foram entregues para uso em um só arquivo “dexnor.gdb”, com 194.655 pontos e as seguintes colunas:

Equest = equipe/estação ;

X = coordenada policônica E (MC = 54° W) ;

Y = coordenada policônica N (MC = 54° W) ;

Elev = elevação em metros (valores de -7,4 m (?) a 695 m) ;

Dens = densidade Bouguer (valores de 0 (?) a 2,7 g/cm³; Média = 1,94) ;

Corab = correção A-B (ar livre mais Bouguer) ;

Gobs = G observado em mGal (menos a constante 970000) ;

Corter = correção de terreno (valores tabelados) ;

Corlat = correção de latitude (calculado com o Gama-30) ;

Boug = anomalia Bouguer ;

Long = longitude (*datum* SAD-69) ;

Lat = latitude (*datum* SAD-69).

O valor de “gobs” ou gravidade observada é o valor obtido através de medidas do gravímetro, seguido das correções de maré, *drift*, erros de fechamento e nivelamento, em relação a um datum específico (neste caso, o Woolard).

Assim, o primeiro passo do reprocessamento foi analisar os valores da coluna “gobs”. Dos 194.655 pontos, 9.274 eram *dummies* e 3.636 estavam com valores zerados ou com problemas de localização, restando assim 181.745 pontos. É importante chamar a atenção para o fato de que, no arquivo “dexnor.gdb” (e nos

outros dados antigos de gravimetria terrestre da Petrobras), os valores de “gobs”, estão subtraídos de uma constante igual a 970.000 mGal. A estes valores corrigidos, aplicou-se a correção de latitude, conforme a equação (4.2), seguindo-se as correções ar-livre, terreno e Bouguer.

Comumente é utilizada uma correção combinada ar-livre mais Bouguer, conhecida como correção de elevação (correção AB nos arquivos da Petrobras). Sendo ρ a densidade Bouguer, tem-se:

$$g_{AB} = (0,0308596 - 0,04192\rho) \text{ mGal/m} . \quad (4.4)$$

A correção Bouguer supõe que o “*slab*” tenha densidade uniforme, o que nem sempre acontece, e extensão horizontal infinita. Para escolha do melhor valor da densidade atribuída ao “*slab*”, geralmente se utiliza a técnica dos perfis de Nettleton (Telford *et al.* 1990). Para contornar o problema da extensão do “*slab*” se utiliza a correção de terreno.

A Figura 3.4 mostra os dados originais gravimétricos disponibilizados, com a localização dos projetos aeromagnéticos utilizados. A Figura 4.1 foi construída com base nos dados já reprocessados, porém abrangendo apenas as áreas correspondentes aos projetos aerogeofísicos estudados. No reprocessamento, foi utilizada uma densidade Bouguer igual a 2,0 g/cm³ (nos dados originais, variam de 1,7 a 2,7 sendo que o valor 2 corresponde a 66% do total e, junto com os valores 1,8 e 1,9 perfazem 98%). Foi empregada uma cela quadrada de 5 km de lado e, para a confecção do mapa, um raio de busca de 70 km.

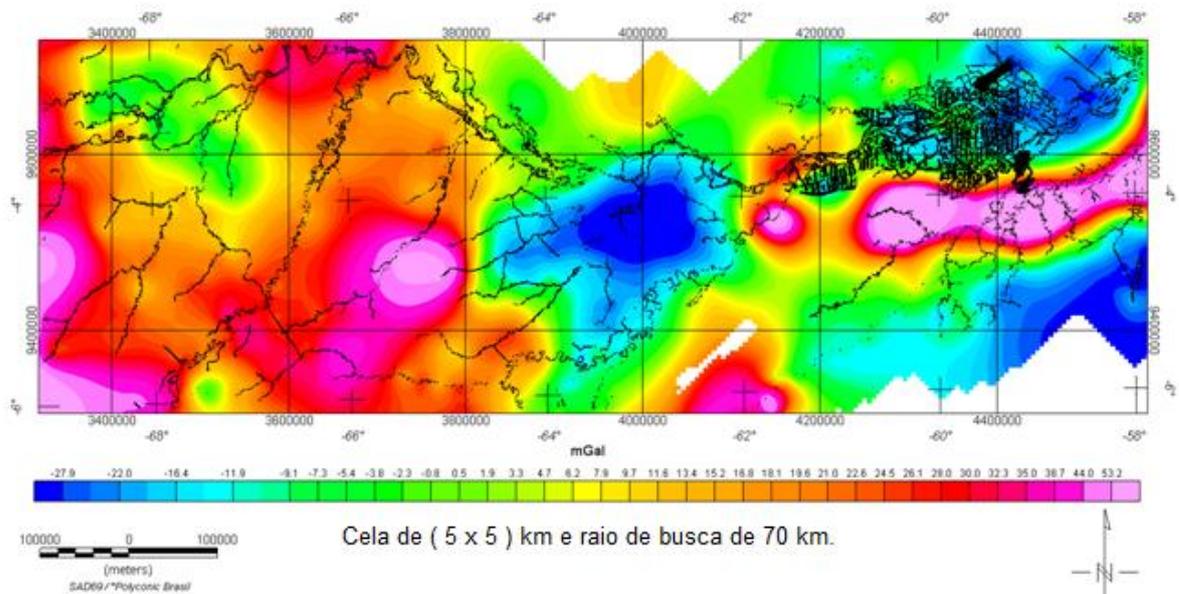


Figura 4.1 - Mapa Bouguer reprocessado da região do Arco Purus (expandida), com localização dos pontos de amostragem.

4.2 – Dados magnetométricos

Os dados magnetométricos por terem sido levantados em períodos bem distintos, correspondem a diferentes tecnologias, tanto de aquisição como de processamento. Tal fato mereceu atenção especial no decorrer do trabalho. A tabela 3.1 mostra que os projetos Manaus Leste e o Manaus Oeste foram levantados no final da década de 1950 e início da de 1960. Por sua parte, os projetos Coari e Carauari, foram obtidos no início da década de 1980. Assim, uma descrição sumária de suas características se faz necessária, para uma visão melhor das limitações interpretativas.

4.2.1 – Projetos Manaus Leste e Manaus Oeste (características)

Fazem parte dos primeiros levantamentos aerogeofísicos feitos no Brasil. Foram utilizados magnetômetros tipo Gulf Mark III, com tecnologia *flux gate*, a mais moderna de então, como uma adaptação de equipamentos desenvolvidos durante a Segunda Grande Guerra para detecção de submarinos. A precisão das medidas era

de 1 nT, porém estas apresentavam deriva de até 6 nT por hora (Hood, 1971). Os dados originais foram extraviados, porém conservaram-se relatórios e mapas de contorno em poliéster (cronaflex), que, por digitalização, permitiram a recuperação parcial dos mesmos. Outro fato que deve ser citado é que o IGRF (*International Geomagnetic Reference Field*) só foi introduzido em 1968. Até então, os levantamentos magnéticos (aéreos ou terrestres) eram reduzidos a um “datum” arbitrário. A Figura 4.2 mostra esses dados em relevo sombreado, onde se nota claramente a recuperação das altas freqüências, como resíduo, devido a erros de nivelamento segundo as linhas de vôo.

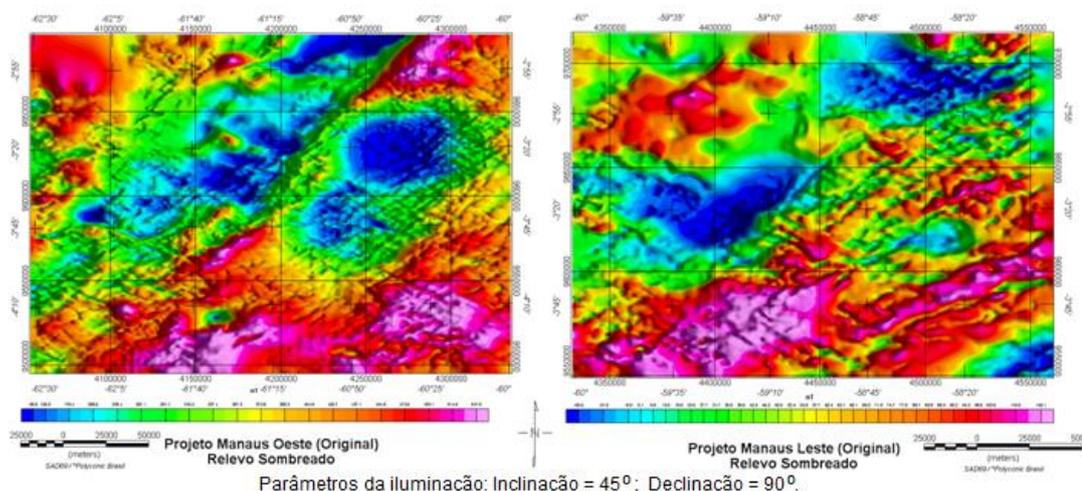


Figura 4.2 - Mapas originais (recuperados) do campo magnético total, reduzido de "datums" arbitrários, dos projetos Manaus Oeste e Manaus Leste.

4.2.2 – Projetos Coari e Carauari (características)

Levantados na década de 1980, tais projetos utilizaram magnetômetros de precessão de prótons com precisão de 1 nT e melhores compensadores, porém apresentaram ainda sérios problemas de nivelamento. O Projeto Carauari, além dos puxamentos N-S, mostrou fortes puxamentos E-W (direção das linhas de controle – Figura 4.3). Como esta é uma direção de grande interesse geológico (próxima da direção do Lineamento Juruá), mereceu tratamento especial, como visto no item a seguir.

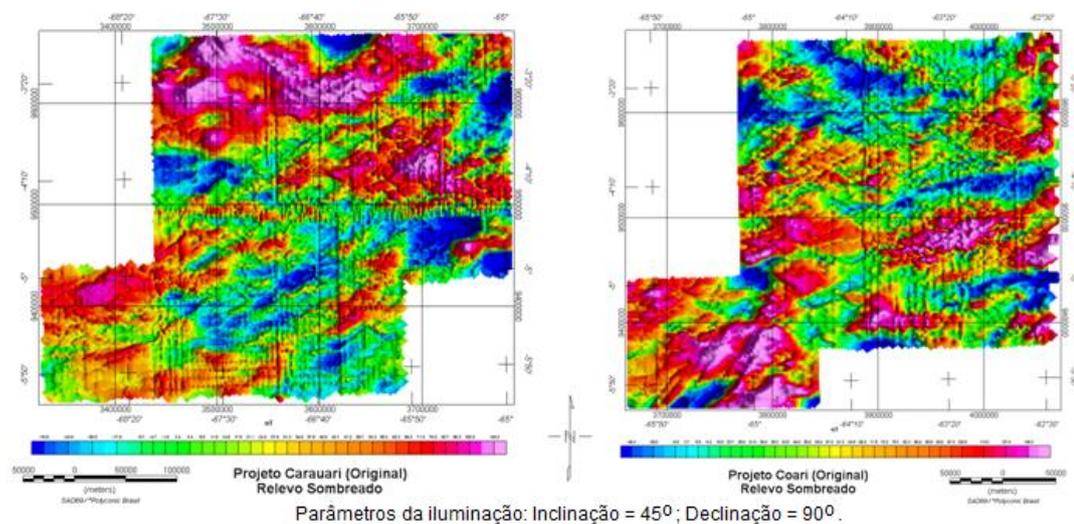


Figura 4.3 - Mapas originais do campo magnético total, reduzido do IGRF, dos projetos Carauari e Coari.

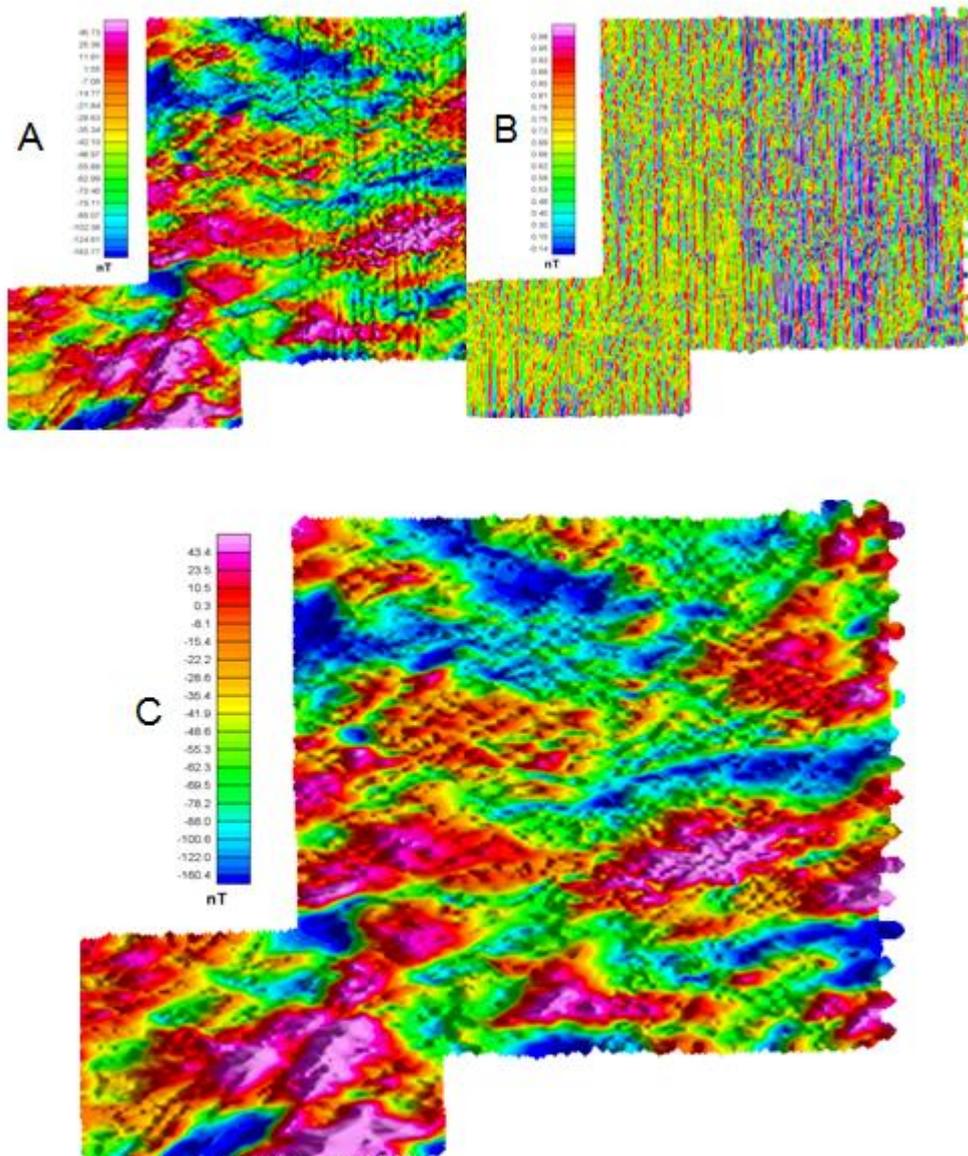
4.2.3 – Re-processamento dos dados

Os projetos estudados apresentaram sérios problemas de aquisição, como era comum no início da prospecção aerogeofísica, tais como a falta de um posicionamento preciso, e o caráter analógico das medições, bem como as precárias condições de funcionamento dos equipamentos de aquisição ou dos compensadores. Mesmo trabalhando com dados pré-processados, foi necessário um refinamento em cada um dos projetos, para depois, elevá-los a uma altura comum de 1000 m. Para facilidade de entendimento, deixamos a descrição dos filtros para o próximo capítulo, citando aqui apenas os procedimentos.

Aplicamos uma técnica conhecida como decorrugação, normalmente usada em micronivelamentos, através da transformada rápida de Fourier (Minty, 1991). Inicialmente, elaborou-se uma malha com os erros de nivelamento, seguida da interpolação desses erros para cada ponto de medição e, finalmente, um “grid” com os valores micro-nivelados, através de um refinamento com o filtro de Naudy.

Como os puxamentos devidos à falta de nivelamento se refletem como alta frequência imposta aos dados reais do levantamento, foi aplicado ao *grid* original, um filtro Butterworth, passa alta, com comprimento de onda de 10 e 12 km no caso dos projetos Carauari e Coari, e 8 e 6 km no caso dos projetos Manaus Oeste e Manaus Leste (quatro vezes o espaçamento entre as linhas de vôo). Ademais, empregou-se um filtro co-seno direcional, passa alta, com direção N-S (a descrição dos filtros se encontra no próximo capítulo). No caso do Projeto Carauari, utilizou-se ainda o filtro Butterworth, com comprimento de onda de 32 km junto com o co-seno direcional segundo E-W. Esse filtro não foi empregado nas outras áreas, para preservação integral das informações nessa direção. O *grid* com os erros de cruzamento, subtraído do *grid* original, já fornece o *grid* nivelado. A decorrução consiste em se obter esse mesmo *grid* a partir dos dados originais subtraídos dos erros de nivelamento interpolados para cada ponto de aquisição. Para se recuperar algum sinal geológico de alta frequência devido a corpos rasos, que porventura tenha sido incluído no *grid* de erros, aplica-se o filtro de Naudy (Naudy e Dreher, 1968), passa baixa, não linear, que basicamente, retira os *spykes* ⁽⁴⁾. A Figura 4.4 mostra essas etapas para o caso do Projeto Coari.

⁽⁴⁾ Pontos espúrios de alta resposta.



Relevo sombreado - Parâmetros da iluminação: Inclinação = 45° ; Declinação = 90° .

Figura 4.4 - Projeto Coari - Etapas do micronivelamento (A - dados originais; B - erros de nivelamento; C - dados nivelados).

4.2.4 – Junção dos Projetos

Após a etapa do nivelamento de cada projeto, todos eles foram elevados para uma altura comum de 1000 m, através da continuação para cima, no domínio da frequência, utilizando-se programas fornecidos pelo *Oasis Montaj* (Geosoft, 2000). Os projetos Coari e Carauari, mais recentes, ambos reduzidos do IGRF, não apresentaram problemas na junção (utilizou-se o programa “gridknit”, também da Geosoft, que, no domínio da frequência, faz a união dos *grids* usando a máxima entropia).

Os projetos Manaus Leste e Manaus Oeste, quando integrados com os Coari-Carauari, apresentaram uma diferença média de 312 nT na área de junção. Esse valor, portanto, foi retirado do campo total nos projetos Manaus Oeste e Manaus Leste. Isto significa que o valor médio da base (em geral, era a mesma utilizada para correção da variação diurna) estava 312 nT acima do valor do IGRF médio no local. Após compatibilizados, os dados foram ainda filtrados com uma média móvel (filtro de Hanning 3 x 3, que praticamente não interfere no conteúdo de frequências). O resultado obtido é apresentado na Figura 4.5.

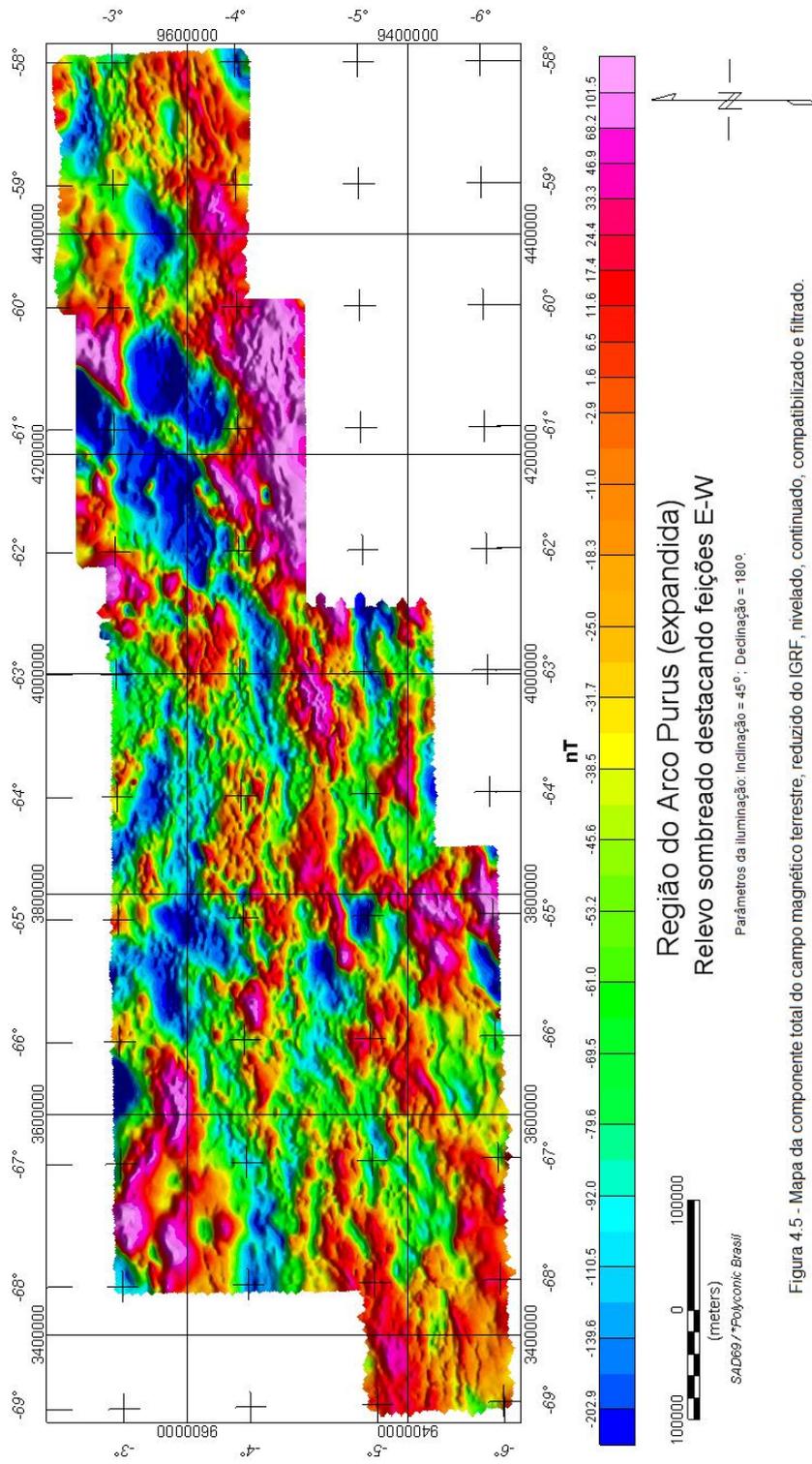


Figura 4.5 - Mapa da componente total do campo magnético terrestre, reduzido ao IGRF, nivelado, continuado, compatibilizado e filtrado.

Capítulo 5

Metodologia e filtros utilizados

O Arco Purus foi definido com base em descrições de furos de sondagens, que mostraram que a sedimentação devoniana correspondente às bacias do Solimões e do Amazonas, não se encontrava naquela região, onde os sedimentos carboníferos assentam diretamente sobre litologias do Pré-Cambriano. O Arco Purus coincide com uma área de grande espessura de rochas meta-sedimentares siliciclásticas da Formação Prosperança, depositadas na forma de gráben, as quais não mostram diferenças significativas de susceptibilidade magnética, se comparadas com as rochas do pacote sedimentar sobreposto. Assim, o modelamento geomagnético direto do Arco Purus fica prejudicado. No entanto, o magmatismo Penatecaua, que atingiu a região no período Triássico, com as bacias já formadas, trouxe assinaturas magnéticas diferentes. As intrusões básicas, na forma de chaminés ao longo das ombreiras do gráben Purus, propiciaram uma delimitação melhor dos limites dessa feição geológica, sobre a qual se assenta o Arco Purus.

Os filtros utilizados para amplificação dos sinais contidos nos dados magnéticos (e, em parte, nos gravimétricos), com o intuito de revelar as estruturas geológicas, estão descritos a seguir.

5.1 – Derivadas – sinal analítico

As derivadas de uma função potencial (campo magnético ou gravimétrico) são de grande utilidade na interpretação dos dados, pois realçam as altas frequências (fontes mais rasas), como é o caso da derivada vertical $\left(\frac{\partial f}{\partial z}\right)$. Além disso, delimitam os limites ou contatos entre corpos com diferentes susceptibilidades magnéticas ou densidades, como é o caso da derivada horizontal $\left(\frac{\partial f}{\partial x}\right) + \left(\frac{\partial f}{\partial y}\right)$. Considerando que, em geral, existem ruídos de alta frequência nos dados coletados, muitas vezes é

necessária uma filtragem prévia com filtros passa-baixa, como, por exemplo, o Butterworth (vide item 5.4). A derivada vertical é calculada no domínio da frequência, e as horizontais, mais facilmente obtidas, no domínio do espaço, podendo também ser computadas no domínio da frequência.

Neste domínio, as derivadas horizontais são definidas por

$$L(\mu) = (\mu i)^n \quad \text{e} \quad L(v) = (v i)^n; \quad (5.1 \text{ e } 5.2)$$

e a vertical por $L(r) = r^n$, (5.3)

sendo:

n a ordem de diferenciação ;

μ e v as componentes x e y no domínio da frequência;

$r = 2\pi k$, sendo k a frequência em ciclos por m ;

$i = \sqrt{-1}$.

O método de Euler utiliza essas três derivadas

$$\left(\frac{\partial f}{\partial x}\right), \left(\frac{\partial f}{\partial y}\right), \left(\frac{\partial f}{\partial z}\right),$$

enquanto os mapas em relevo sombreado empregam as derivadas horizontais

$$\left(\frac{\partial f}{\partial x}\right) \text{ e } \left(\frac{\partial f}{\partial y}\right).$$

O método conhecido como *tilt derivative* ou inclinação do sinal analítico foi descrito por Miller e Singh (1994) e é muito utilizado em interpretações magnéticas, realçando sinais de fontes mais rasas, como também de grandes lineamentos profundos. O *tilt derivative* é a razão entre a primeira derivada vertical e a primeira derivada horizontal da componente total do campo magnético, sendo dada por:

$$\arctan \textit{tilt} = \left(\frac{VDR}{THDR} \right), \quad (5.4)$$

$$\text{onde} \quad VDR = \left(\frac{\partial f}{\partial z} \right) \quad (5.5)$$

$$\text{e} \quad THDR = \left(\left(\frac{\partial f}{\partial x} \right)^2 + \left(\frac{\partial f}{\partial y} \right)^2 \right)^{\frac{1}{2}} \quad (5.6)$$

O sinal analítico é a raiz quadrada da soma dos quadrados das derivadas parciais

$$sa = \left(\left(\frac{\partial f}{\partial x} \right)^2 + \left(\frac{\partial f}{\partial y} \right)^2 + \left(\frac{\partial f}{\partial z} \right)^2 \right)^{1/2}. \quad (5.7)$$

O Método de Euler Estendido utiliza o sinal analítico para automaticamente determinar o tamanho da janela empregada para o cálculo das profundidades e localizações das fontes causadoras.

5.2 – Continuação para cima

A continuação para cima é um filtro “bem comportado”, que transforma um campo medido em determinada altitude para outra maior, mais distante da fonte causadora. Sua aplicação atenua todas as freqüências, porém com maior intensidade as altas freqüências. Tal procedimento é adequado, quando se quer minimizar os efeitos de fontes rasas, como diques e soleiras próximas à superfície, e ressaltar as fontes mais profundas, provenientes do embasamento subjacente à coluna sedimentar. A continuação para cima também é muito útil quando se quer juntar levantamentos originalmente adquiridos em diferentes altitudes, como é o caso dos projetos aeromagnéticos estudados. O filtro de continuação para cima é

considerado um filtro limpo, ou suave, pois não produz efeitos de borda, nem requer a aplicação de outros filtros para corrigi-lo ou atenuá-lo.

Este filtro é expresso por (Geosoft, 2000)

$$L(r) = e^{-hr} \quad , \quad (5.8)$$

sendo "h" a altura considerando-se o plano de medidas igual a 1 e " r " a freqüência em radianos por unidade de medida (no caso m). Em levantamentos aerogeofísicos, é comum usar-se ($r = 2\pi k$), sendo k medido em ciclos/m. A Figura 5.1 mostra a atenuação do filtro, de acordo com a freqüência.

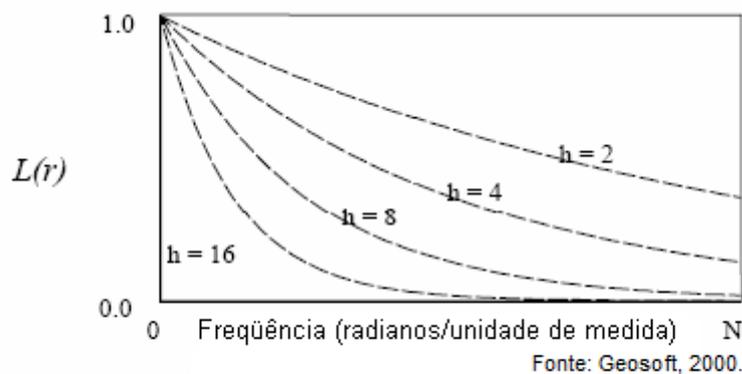


Figura 5.1 - Atenuação do filtro continuação para cima.

Blakely (1995) traz uma descrição detalhada da teoria, não só deste método, mas de vários outros aplicados em métodos potenciais.

5.3 – Redução ao pólo

A redução ao pólo é usada em regiões de médias latitudes magnéticas para visualizar os dados como se fossem observados no pólo, ou seja, onde a inclinação é vertical. A interpretação de dados magnéticos se torna muito mais fácil, com altos magnéticos regionais correspondendo a altos estruturais em bacias sedimentares, desde que esses altos sejam formados por rochas com suscetibilidades magnéticas maiores que os sedimentos, ou à presença de grande volume de soleiras.

A redução ao pólo é definida por:

$$L_{(\theta)} = \frac{N}{D1 \times D2} \quad , \quad (5.9)$$

onde: $N = (\text{sen}(I) - i \cos(I) \cos(D - \theta))^2$,

$$D1 = (\text{sen}^2(I\alpha) + \cos^2(I\alpha) \times \cos^2(D - \theta)) \quad ,$$

$$D2 = (\text{sen}^2(I) + \cos^2(I) \times \cos^2(D - \theta)) \quad ,$$

sendo:

I = inclinação magnética na área;

D = declinação magnética na área;

$I\alpha$ = inclinação para correção de amplitude (esta correção tem que ser necessariamente maior que I);

θ = direção da feição magnética.

O termo $i \cos(I) \cos(D - \theta)$ é a componente de fase; o termo $\text{sen}(I\alpha)$ corresponde à componente de amplitude.

O grande problema da redução ao pólo é que, nas regiões próximas ao equador magnético, os corpos magnéticos com direções próximas de N-S receberão um forte incremento, podendo chegar a explodir (*blow-up*) devido à forte correção de amplitude, quando $(D - \theta)$ for $\pi / 2$ (corpos N-S, com componentes no domínio da frequência E-W). Especificando-se um alto valor para a correção de amplitude, minimiza-se este problema, porém o resultado obtido tem apenas valor qualitativo.

Nesta tese, a interpretação dos dados aeromagnéticos, para falhas e estruturas geológicas profundas (Figura 6.4, no próximo capítulo), foi feita sobre mapas continuados e reduzidos ao pólo. Esta redução exige que se informe, a inclinação e a declinação magnéticas da área, na data em que os dados foram adquiridos. Como se tratam de quatro projetos, voados em diferentes épocas (Tabela 3.1), e, mesmo contíguos, se estendendo por 1200 km, a redução foi feita, usando-se, para cada projeto, os valores médios no centro de cada área. Após tal

procedimento, os *grids* foram integrados, usando-se a mesma técnica descrita no item 4.2.4.

Os valores médios para a inclinação magnética, declinação magnética e intensidade do campo magnético (este último valor não é usado na redução ao pólo, mas faz parte das características do campo geomagnético – IGRF) são, para uma altura de 1 km, mostrados na tabela 5.1. Observa-se que todos os valores de inclinação magnética são positivos, indicando tratar-se do hemisfério norte magnético.

PROJETO	Ponto (1)	Data (2)	Dec. (3)	Inc. (4)	Int.CT (5)
Manaus E	-3.5° / -59.0°	01-09-1957	-7.4°	19.0°	28825 nT
Manaus W	-3.5° / -61.0°	01-12-1960	-6.5°	18.9°	28759 nT
Coari	-4.5° / -64.0°	01-06-1984	-7.8°	15.2°	27003 nT
Carauari	-4.5° / -67.0°	01-01-1982	-5.2°	16.2	27429 nT

(1) – Latitude / Longitude do ponto médio geográfico da área do projeto.

(2) – Data média durante o período aquisitivo dos dados.

(3) – Declinação magnética.

(4) – Inclinação magnética.

(5) – Intensidade da componente total do campo magnético.

Tabela 5.1 – Valores médios do campo magnético na área de estudo.

5.4 – Filtros Butterworth – coseno direcional - Naudy

Em gravimetria, os citados filtros são muitos usados quando se quer retirar o regional na busca de anomalias mais rasas, como, por exemplo, a influência de soleiras e diques no pacote sedimentar.

Na magnetometria, são utilizados para “limpar” os dados no processo de nivelamento, através da decorrugação. Para isso, utiliza-se os filtros Butterworth, coseno direcional e passa baixa.

O Butterworth é indicado para a filtragem (passa-baixa ou passa-alta) de feições lineares, porque, fixando-se uma freqüência determinada, pode-se variar uma faixa de freqüências que se deseja filtrar, eliminando-se o fenômeno de Gibbs (anelamento), que comumente ocorre quando se passa filtros corta-baixa ou corta-alta com freqüências de corte abruptas, pré-definidas.

O corte é dado pela expressão

$$L(k) = \frac{1}{1 + \left(\frac{k}{k_c}\right)^n} \quad (5.10)$$

A Figura 5.2 mostra o comportamento do filtro, onde “ k_c ” é a freqüência central e, quanto maior o valor de “ n ”, mais fechada é a banda que se deseja cortar.

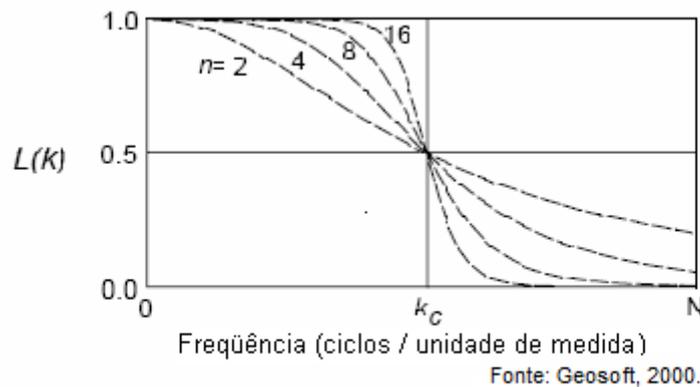


Figura 5.2 - Atenuação do filtro Butterworth.

O Coseno Direcional é indicado para remover feições lineares, por ser um filtro suave, capaz de evitar problemas de anelamento. A largura da janela do filtro pode também ser controlada através do grau da função coseno. É indicado (junto com o Butterworth) para filtrar *grids* desnivelados, comuns em levantamentos geofísicos aéreos, no processo de decorrugação.

Este filtro é definido por

$$L(\theta) = \left| \cos^n(\alpha - \theta + \pi/2) \right|, \text{ para rejeitar a direção } \alpha \quad (5.11)$$

$$L(\theta) = 1 - \left| \cos^n(\alpha - \theta + \pi/2) \right|, \text{ para passar a direção } \alpha, \quad (5.12)$$

sendo “ α ” a direção do filtro e “ n ” o grau da função coseno.

A Figura 5.3 mostra o comportamento do filtro coseno direcional.

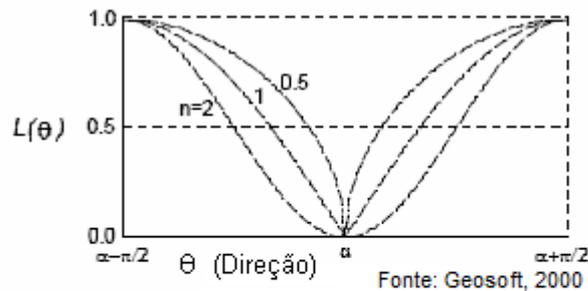


Figura 5.3 - Atenuação do filtro coseno direcional.

O filtro de Naudy (Naudy e Dreher, 1968) é não linear, isto é, decide em cada ponto pela existência ou não de ruído. No primeiro caso, o ponto é substituído por outro, baseado numa média definida para os pontos vizinhos. É geralmente utilizado para retirar *spikes*.

5.5 – Deconvolução de Euler

Dada uma função

$$f = f(x, y, z), \quad (5.13)$$

se, ao substituirmos x por tx , y por ty e z por tz , tivermos

$$f(tx, ty, tz) = t^n f(x, y, z), \quad (5.14)$$

a função $f(x, y, z)$ é dita homogênea de grau n .

Leonhard Euler, famoso matemático que viveu no século XVIII, demonstrou que, para funções homogêneas, a seguinte equação é satisfeita:

$$x\left(\frac{\partial f}{\partial x}\right) + y\left(\frac{\partial f}{\partial y}\right) + z\left(\frac{\partial f}{\partial z}\right) = nf, \quad (5.15)$$

sendo esta equação conhecida como *equação da homogeneidade de Euler*.

Thompson (1982) mostrou que, para fontes magnéticas simples (pólo, dipolo, linha de pólos, etc.), se pode escrever

$$f(x, y, z) = G/r^N \quad (5.16)$$

que é uma equação homogênea de grau $n = -N$

onde $r = (x^2 + y^2 + z^2)^{1/2}$ \mathbf{r} , é o módulo do vetor posição, com \mathbf{r} , representando o vetor unitário na direção de r e G uma função independente de x , y e z .

Os campos potenciais, como o magnético e o gravimétrico, são regidos por funções homogêneas. Considerando-se a fonte em (x_0, y_0, z_0) e as medições feitas em (x, y, z) , a Equação de Euler tornar-se-á

$$(x - x_0) \frac{\partial f}{\partial x} + (y - y_0) \frac{\partial f}{\partial y} - z_0 \frac{\partial f}{\partial z} = -nf \quad (5.17)$$

onde se considera $z = 0$ (altura de vôo, no caso de levantamentos aéreos). As variáveis x e y são as coordenadas do ponto de medição, f o valor da função (campo magnético ou gravimétrico), $\partial f / \partial x$, $\partial f / \partial y$ e $\partial f / \partial z$, as primeiras derivadas parciais do campo, x_0 , y_0 e z_0 as incógnitas. O parâmetro n (índice estrutural) é um valor que depende do tipo de fonte, ou seja, da razão da variação do campo com a distância.

Para modelos simples de fontes magnéticas, Thompson (1982), citando Smellie (1967) e Hood (1965), emprega os seguintes valores:

Linha de pólos	$N = 1,0;$
Pólo unitário	$N = 2,0;$
Linha de dipolos	$N = 2,0;$
Dipolo unitário	$N = 3,0.$

Na equação 5.17, embora se possa tratar “ n ” como incógnita, o melhor é fixarmos o valor de “ n ” e calcularmos apenas a localização da fonte causadora (x_0, y_0, z_0) . No caso de contatos magnéticos, uma boa aproximação é o uso, como modelo, de um prisma, onde uma das faces está muito distante da outra, ou uma falha de rejeito infinito. A Tabela 5.2 relaciona modelos geológicos com o índice estrutural para dados magnéticos e gravimétricos.

O método de Euler, conforme apresentado pela Equação (5.17) é chamado de Euler 3D. Trabalha em cima de “grids”, onde se define uma janela que varre toda a área, resolvendo os sistemas de equações para cada janela. As soluções são filtradas de antemão, de modo a só serem aceitas, aquelas que satisfizerem determinados pré-requisitos. As soluções consideradas válidas são colocadas em

⁵ No caso de se ter um campo regional “B”, “P” deve ser substituído por “f-B”

um banco de dados e sujeitas a novos critérios de seleção, para então serem interpretadas.

Índice Estrutural	Campo Magnético	Campo Gravitacional
0,0	Contato	Soleira/dique/falha
0,5	Falha grande rejeito	Dique fino
1,0	Soleira/dique	Chaminé
2,0	Chaminé	Esfera
3,0	Esfera	-

Tabela 5.2 – Índices estruturais para diferentes corpos magnéticos ou gravimétricos.

Um ponto crucial para o êxito do método é a escolha do tamanho da janela. A solução do sistema de equações leva à localização de uma determinada fonte. Porém, é fato que o sinal analisado não provém de uma só fonte, mas da interação de várias fontes vizinhas. Além disso, não se sabe se o sinal analisado contém todas as características da função (máximo, mínimo, pontos de inflexão, etc.) para uma determinada fonte. Assim, o ideal é o emprego de uma janela não tão grande, de modo a diminuir a influência de corpos vizinhos e não tão pequena que não contenha a individualização da anomalia.

Uma informação complementar nesse sentido vem do uso do sinal analítico em toda a área, para definição do tamanho (ou tamanhos) da janela. Já existe um programa que faz isso automaticamente (Euler estendido, da Geosoft). Porém, como não há controle sobre os parâmetros, foi utilizado na presente dissertação, o método Euler 3D com janela fixa, pré-definida.

Capítulo 6

Interpretação dos dados

Os dados magnéticos trabalhados e mostrados na Figura 4.5 formam a base sobre a qual elaborou-se a interpretação dos mesmos, utilizando-se os filtros descritos no capítulo anterior. A consistência da interpretação foi verificada pelos dados gravimétricos, como método auxiliar, e dados de poços, como mandatórios. Procurou-se, na medida do possível: (i) - representar mapas com grandes comprimentos de onda, buscando-se rastrear os limites do Gráben e Arco Purus em sub-superfície; (ii) – buscar estruturas formadas durante a tectônica Juruá, que criou a zona de falhas e dobras escalonadas, afetando as soleiras, e que, devido a sua forte resposta magnética, pode ser uma ferramenta de grande ajuda no esforço exploratório, e (iii) – analisar o controle da rede de drenagem atual, através de lineações magnéticas profundas, sugerindo o prosseguimento dos esforços tectônicos (neo-tectônica) na região.

6.1 – O arcabouço tectônico regional

A Figura 6.1 ilustra o arcabouço estrutural conforme publicado pela Petrobrás, com base em dados sísmicos e de sondagens, segundo Caputo e Silva (1990), para a Bacia do Solimões, e Cunha *et al.* (1994), para a Bacia do Amazonas. Nesta última, a figura traz informações sobre o comportamento estrutural do substrato da bacia, como a direção geral E-W do seu eixo, que virga para NE, na altura do meridiano -59° . Neste local, seu depocentro, atinge mais que 5500 m de profundidade e o mergulho da bacia, na sua aba sul, é da ordem de 3° (1/20) para N. Quanto à Bacia do Solimões, as informações do substrato são mais escassas. Porém, aquelas que se referem às estruturas mais novas, da tectônica Juruá, são abundantes. O furo 1-NSM-01, nesta bacia (Figuras 3.1 e 3.2), atingiu o embasamento cristalino a aproximadamente 3500 m.

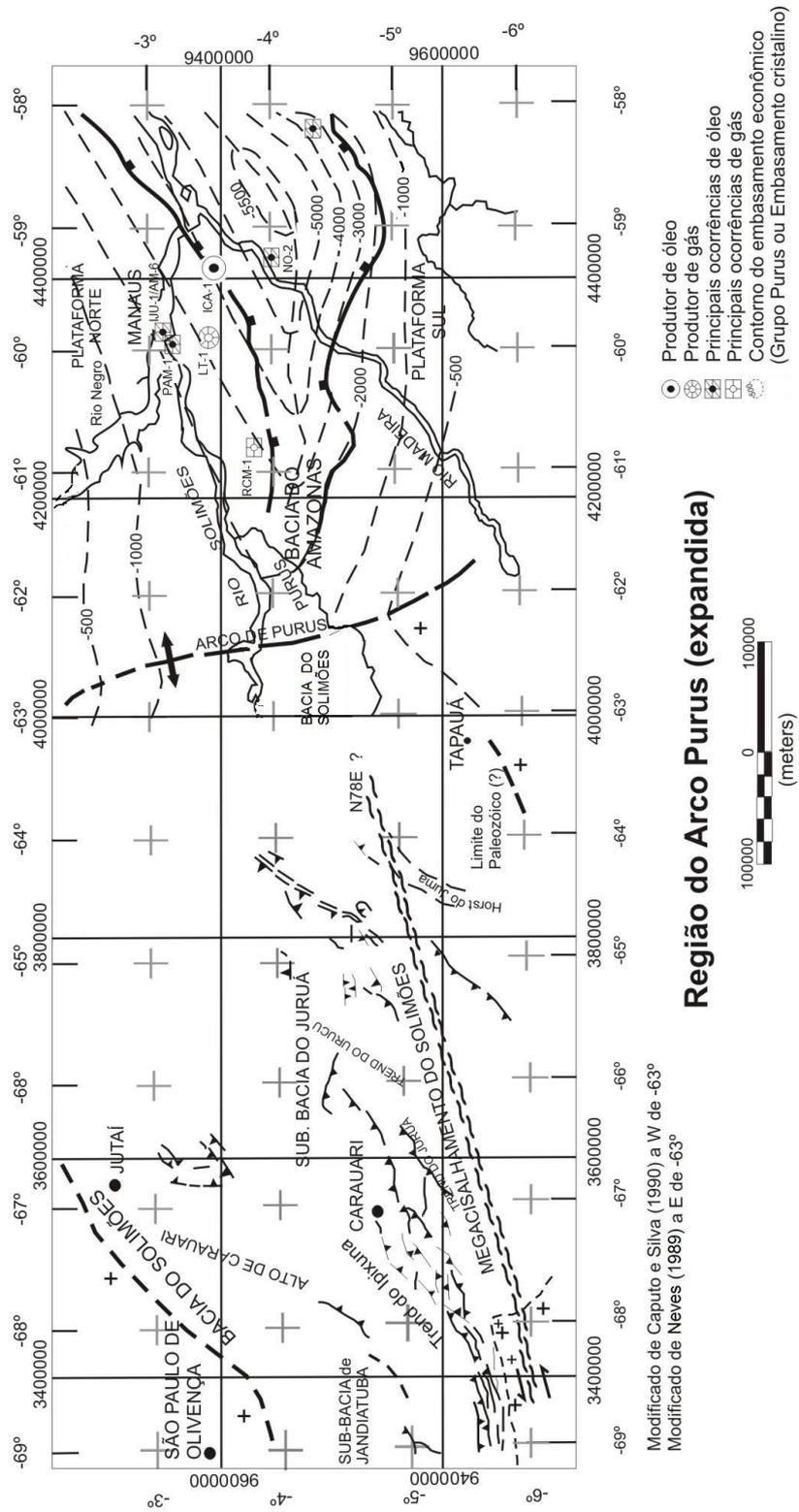


Figura 6.1 - Arcabouço estrutural conhecido das bacias do Solimões e do Amazonas

6.1.1 – Fontes gravimétricas

A Figura 6.2 apresenta o mapa gravimétrico, obtido com dados fornecidos pelo satélite Grace (*Gravity Recovery and Climate Experience*; Tapley *et al.* 2005), que inclui os dados da Petrobras, para ampliação e melhor visualização de toda área estudada. Como a amostragem é muito escassa (não maior que a da Figura 4.1), a resolução é muito baixa para os objetivos desta tese, que se concentram na parte superior da crosta terrestre.

Na região da Bacia do Amazonas, aparece um alto gravimétrico acompanhando o depocentro da mesma, devido à subida do manto, conforme a conceituação de Nunn e Aires (1988). Na região do Arco Purus, esta grande anomalia positiva, não tem prosseguimento, mas é barrada pelo mesmo, que se expressa como um grande baixo, indicando um espessamento das rochas menos densas do Grupo Purus, em relação às do embasamento cristalino. A norte e a sul da região do arco, o baixo gravimétrico não é tão bem pronunciado.

Na altura do meridiano -65° , voltam a aparecer altos valores gravimétricos, com boa correspondência com os dados magnéticos, indicando o prosseguimento desses corpos profundos para regiões mais altas da crosta, na forma de chaminés de rochas magnéticas básicas, supridoras das soleiras e diques. Ainda neste capítulo, serão tratadas as idades relativas aos eventos responsáveis por esses corpos ou estruturas. Com efeito, a formação do *gráben* do Purus é do Proterozóico Superior, a subida do manto associada à formação das bacias do Solimões e do Amazonas é do Ordoviciano e as soleiras e diques do final do Triássico e início do Jurássico.

Outras considerações sobre os dados gravimétricos, na parte oeste da região estudada, são muito especulativas, em virtude da amostragem ter sido feita ao longo de rios, com pontos às vezes separados por 100 km ou mais.

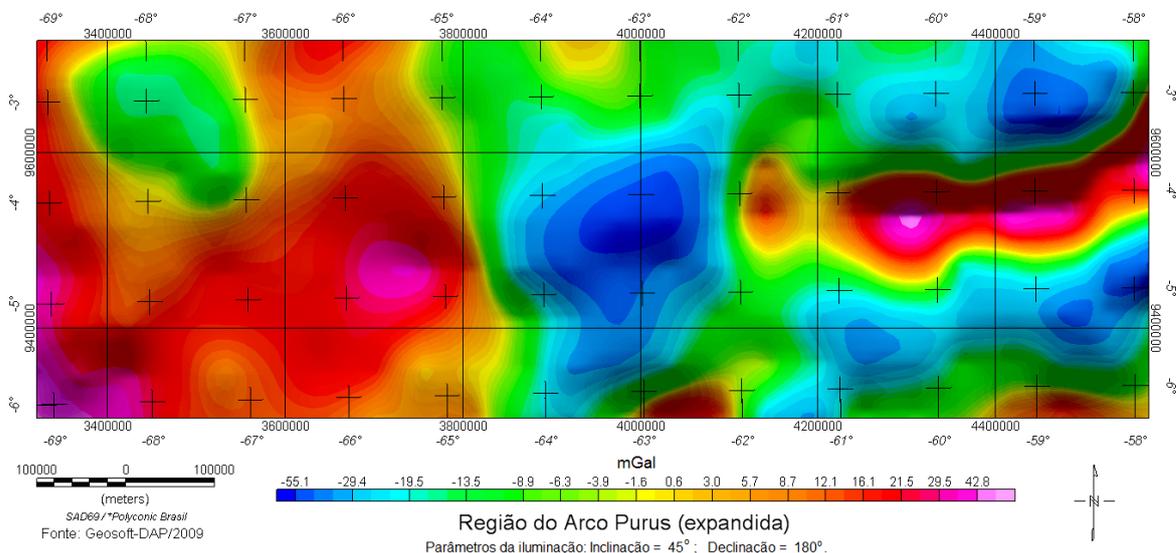


Figura 6.2 - Mapa gravimétrico da região do Arco Purus, obtido com dados do satélite Grace, compilados com dados da Petrobras.

6.1.2 – Fontes magnéticas profundas

Os dados aeromagnéticos da Figura 4.5 mostram um forte lineamento ENE-WSW na maior parte da área mapeada, tendendo para NE-SW na região da Bacia do Amazonas e E-W a norte da Bacia do Solimões.

Grandes lineamentos retilíneos (representativos de falhas) NW-SE cortam essas feições geomagnéticas. Na região entre os meridianos $-62,5^{\circ}$ (onde se situa o eixo do Arco Purus) e -65° (onde foi interpretado, nesta tese, o limite ocidental do *gráben* principal, que constitui o Arco Purus), observa-se uma tênue variação no conteúdo de freqüências, indicativa de variações no comportamento do substrato cristalino (baixas ou médias freqüências) ou das soleiras e diques (altas freqüências).

A continuação para cima, por suas características de reduzir mais intensamente as altas freqüências do que as baixas (Figura 5.1), aliada à redução

ao pólo (item 5.3), que centraliza as anomalias sobre os corpos que as produzem, foi utilizada na interpretação dos dados magnéticos, visando à determinação de falhas e estruturas geológicas profundas. Para melhor realçar os limites do Arco Purus, os dados magnéticos foram elevados para 10 km, com a subsequente aplicação do filtro da redução ao pólo, empregando um fator de correção de amplitude de 70° . Como a área estudada é bastante extensa (1200 km x 400 km), utilizamos ainda dados públicos do *World Digital Magnetic Anomaly Map* na sua nova versão EMAG2 (*Earth Anomaly Magnetic Grid with 2-minutes-arc resolution*) (Maus et al. 2009).

A Figura 6.3 mostra o resultado obtido, e nela, devido à menor interferência do sinal proveniente dos diques e soleiras, pode-se notar uma maior correspondência com os dados gravimétricos, na região entre os meridianos $-62,5^\circ$ e $-65,0^\circ$, correspondente ao *gráben* principal do Purus, onde aparecem estruturas orientadas segundo N-S. A Bacia do Amazonas também é bem ressaltada, nos dados reduzidos ao pólo, mas a do Solimões, mais rasa, e localmente com um formato mais circular, não responde tão bem, com a aplicação deste filtro.

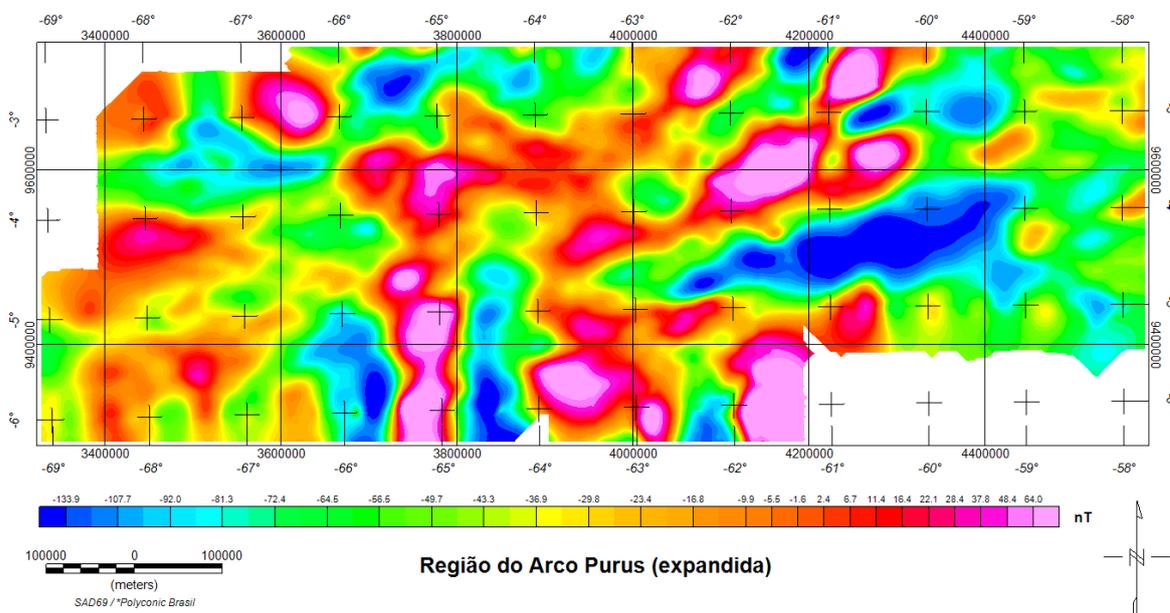


Figura 6.3 - Campo magnético total continuado para 10 km e reduzido ao pólo.

Para reforçar a interpretação geológica das estruturas profundas, que controlaram tanto a deposição das bacias paleozóicas como a do Grupo Purus, de idade neo-proterozóica, foi ainda utilizado, o resultado fornecido pela deconvolução de Euler, para fontes magnéticas profundas (maiores que 4 km). Neste procedimento empregou-se uma janela quadrada de 20 km de lado. Tal técnica, não pode ser aplicada aos dados gravimétricos, devido à escassa amostragem, considerando que o método utiliza as primeiras derivadas do sinal.

A *equação da homogeneidade de Euler* (Equação 5.15 ou 5.17, no item 5.5) independe da inclinação do campo indutor. Porém, como nos dados reduzidos ao pólo interfere-se fortemente nas frequências e amplitudes, o resultado tem apenas valor qualitativo (interpretativo). Assim, a aplicação do método de Euler foi feita sobre os dados “originais” do campo total, como mostrado na Figura 4.5.

Deve-se ressaltar que o método de Euler, que fornece as localizações e profundidades das fontes magnéticas (ou gravimétricas) é estatístico. Como a malha utilizada é de (1 x 1) km e a janela de (20 x 20) km, tem-se para cada janela um sistema de 400 equações com 3 incógnitas. A janela percorre toda a área de estudo, na qual o sistema de equações é resolvido 448.400 vezes (área de 1180 km por 380 km). Os resultados são filtrados por parâmetros pré-fixados pelo intérprete. Utilizamos três diferentes índices estruturais: para diques e soleiras, falhas de grande rejeito e chaminés (Tabela 5.1). A Figura 6.4, ilustra os resultados mais coerentes obtidos para essas fontes profundas.

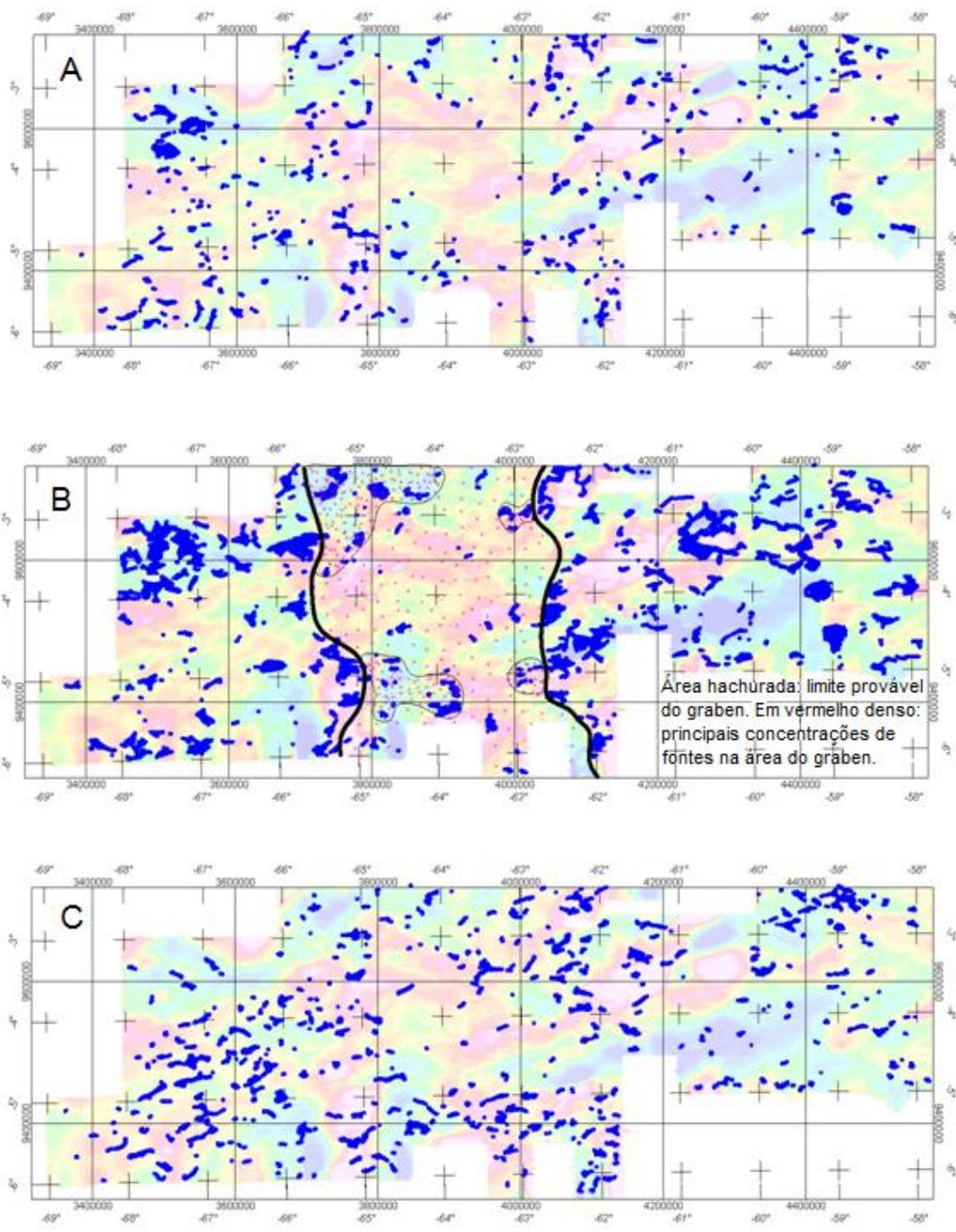


Figura 6.4 - Fontes magnéticas profundas ($<-4\text{ km}$), obtidas com a deconvolução de Euler, com janela quadrada de 20 km de lado, para diques e soleiras (A), falhas de grande rejeito (B) e chaminés (C).

A Figura 6.5 traz a interpretação dos dados magnéticos continuados a 10 km e reduzidos ao pólo. Eles são exibidos com mais nitidez na Figura 6.3, e na Figura 6.5 estão esmaecidos, para melhor destaque da interpretação.

A diminuição do forte sinal magnético proveniente dos diques e soleiras, através da continuação para cima, foi fator fundamental na discriminação dos limites do *gráben*, pois esses corpos, mais novos e rasos, ultrapassam e mascaram esses limites, dificultando a interpretação.

Assim, com a aplicação desses filtros, o *gráben* do Purus se revelou como uma grande estrutura aproximadamente N-S, com feições magnéticas mais suavizadas, se estendendo por toda área, com cerca de 250 a 300 km de largura. A área hachurada, na Figura 6.5, é, provavelmente, a de maior espessura do Grupo Purus, no interior do *gráben* principal. Tal resultado concorda com o modelo proposto por Wanderley Filho *et al.* (2006), mostrado na Figura 2.7, e com o perfil longitudinal A-A` (Figuras 3.1 e 3.2). Os furos 2-PUST-01 e 1-IA-01 (Figura 3.2) mostram um suave mergulho para W do topo do Grupo Purus.

As ocorrências do Grupo Purus, entretanto, não se restringem a este *gráben*, mas o extrapolam. A Formação Prosperança, por exemplo, foi descrita por Paiva (1929), na localidade homônima, cerca de 20 km a jusante de Moura, no Rio Negro, sendo por ele considerada de idade Eo-Paleozóica, e constituída por arenitos homogêneos, horizontais. Caputo *et al.* (1972), revalidaram e formalizaram o nome Formação Prosperança, citando várias localidades, a sul e a norte da Bacia do Solimões, onde a mesma aflora. No mapa geológico do Projeto RADAMBRASIL, Folha Purus (Araújo *et al.*, 1978), foi mapeada uma grande faixa desta formação no Rio Aripuanã, cerca de 100 km a montante de sua foz, no Rio Madeira, estendendo-se para E, na Folha Tapajós.

O comportamento estrutural do *gráben* principal, como exibido na Figura 3.2, evidencia o seu caráter invertido, tendo o mesmo, funcionado como o arco delimitador das bacias do Solimões e do Amazonas desde o Ordoviciano. Sua borda

oriental corresponde ao eixo do Arco Purus, como já conhecido por dados sísmicos e de perfurações. Tanto nesta borda, como na ocidental, se concentram grandes quantidades de intrusões básicas, que propiciaram sua detecção magneticamente. Assim, apesar dos fatores limitativos, como estar próximo do equador magnético, e possuir direção próxima do N-S magnético, foi possível graças à assinatura magnética das intrusivas básicas delinear a forma geral do Gráben Purus.

A Figura 6.4, com os resultados da deconvolução de Euler, reforça esta interpretação e mostra, entre os paralelos $-4,0^{\circ}$ e $-5,0^{\circ}$, uma parte mais profunda dentro do *gráben*, o que também é corroborado com os dados gravimétricos (Figura 6.2). Grandes falhamentos NW-SE e NE-SW se destacam na Figura 6.5, cortando inclusive a região do *gráben*. Na parte B da Figura 6.4, colocou-se um limite aproximado da região onde termina a influência de grandes corpos básicos, para uma região onde eles são mais rarefeitos, a qual corresponde ao Gráben do Purus. Será visto adiante, para fontes mais rasas, que esse limite se desloca para E, sugerindo um mergulho para W, da falha ocidental que limita o *gráben*.

Além das grandes intrusões básicas profundas, ao longo das falhas limitantes do Gráben Purus, existem concentrações desse tipo de rochas, nas porções NW (Alto de Caruari) e na parte NE (Plataforma Norte) da Figura 6.5. Na Bacia do Solimões, aparecem isoladas, o mesmo ocorrendo na do Amazonas. Porém, nesta última, a gravimetria mostra a existência de extensas intrusões, seguindo aproximadamente seu depocentro (Figura 3.4), cujo modelamento situa o topo das mesmas a 20 km de profundidade (Nunn e Aires, 1988). Considerando-se apenas o grau geotérmico médio (Oliveira *et al.*, 2008), atingir-se-á a cerca de 18 km de profundidade, a temperatura de Curie para a magnetita (575° C), daí a inexistência de resposta magnética para essas intrusões. A grande concentração de fontes situadas nessa bacia, na longitude de 59° W, corresponde ao ápice de tais intrusões, onde as temperaturas são menores.

Outro aspecto observado na Figura 6.4, principalmente em sua parte C, correspondente às chaminés, é que existe um alinhamento de fontes na direção WSW-ENE (a mesma do megacisalhamento do Solimões) na região da Bacia do

Solimões, e que prossegue até o eixo do Arco Purus (falha oriental do *gráben*), mas não prossegue na Bacia do Amazonas. Entretanto, coincide, grosso modo, com sua linha de charneira.

A Figura 6.4 traz resultados pontuais de fontes geralmente mais profundas que as representadas pelo mapa da Figura 6.5 (fontes de todas as profundidades vistas à maior distância). Assim, por exemplo, uma grande concentração a N do Arco de Carauari e outras na Bacia do Amazonas não são representadas nesta última.

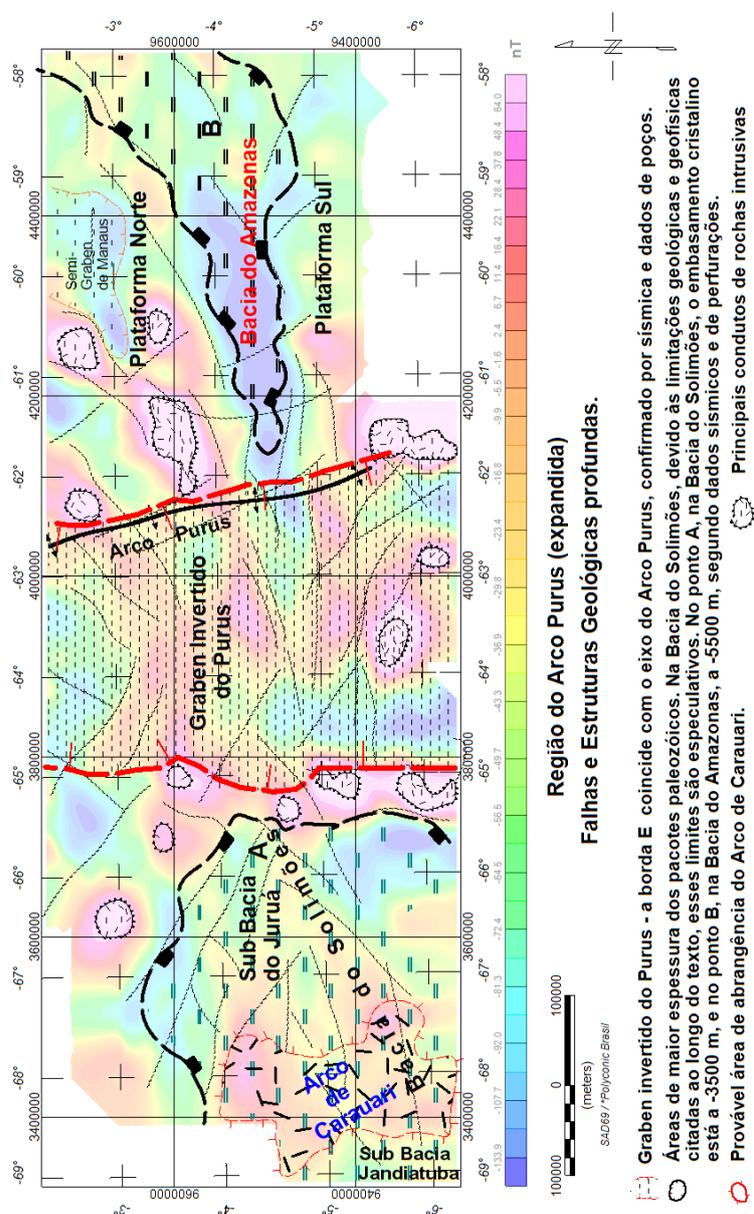


Figura 6.5 - Interpretação de dados magnéticos da região do Arco Purus, continuados a 10 km e reduzidos ao pólo.

6.2 – Os diques e soleiras – fontes magnéticas médias e rasas

As figuras 6.6 e 6.7 correspondem aos resultados obtidos com a aplicação do método de Euler para fontes com profundidades intermediárias (entre 4 e 2 km) e rasas (profundidades menores que 2 km). Como na Figura 6.4, os melhores resultados aparecem nas figuras correspondentes à letra B (falhas). No caso da letra C (chaminé), nessas regiões menos profundas, elas ficam sem sentido (Figura 6.6-C) ou inexistentes (Figura 6.7-C, onde só aparecem em casos isolados e limitados à parte norte da área, onde o embasamento tende a aflorar).

As figuras 6.6-B e 6.7-B mostram claramente a região do *gráben* invertido do Purus como unidade geomagnética distinta da parte oeste (bloco do Solimões) e da parte leste (bloco do Amazonas). Tanto na parte norte como na parte sul do *gráben* (ou bloco do Purus) existem “pontes” ligando os blocos oeste e leste. Entretanto, em sua parte central, há uma escassez de fontes magnéticas, indicando um maior desenvolvimento do pacote metassedimentar do Grupo Purus ou sedimentar paleozóico da Bacia do Solimões, o que é confirmado pelos dados gravimétricos (Figura 6.2).

Os limites traçados (parte B, das figuras 6.4, 6.6 e 6.7) para delimitar os blocos, sugerem, no sentido ascendente (da Figura 6.4 para fontes profundas, até a Figura 6.7, para fontes rasas), um empurrão na direção E, proveniente da região andina, com resposta marcante na parte central do *gráben*, por onde se propagou a faixa de falhas e dobras escalonadas, que formam as principais trapas da Bacia do Solimões. A Figura 6.7-A que traduz o resultado de fontes rasas na forma de diques e soleiras, praticamente oblitera essas informações.

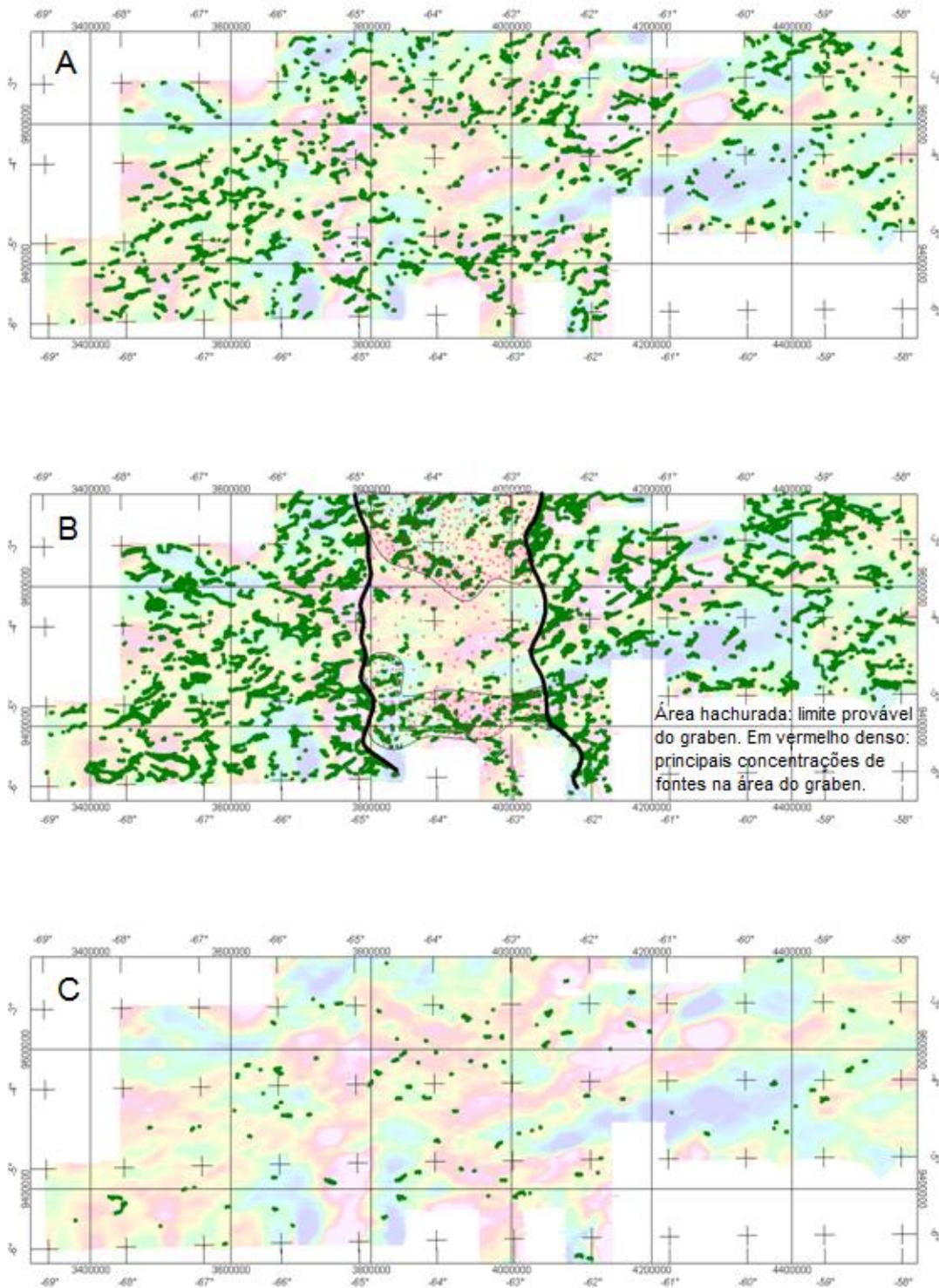


Figura 6.6 - Fontes magnéticas de média profundidade (-4 a -2 km), obtidas com a deconvolução de Euler, com janela quadrada de 20 km de lado, para diques e soleiras (A), falhas de grande rejeito (B) e chaminés (C).

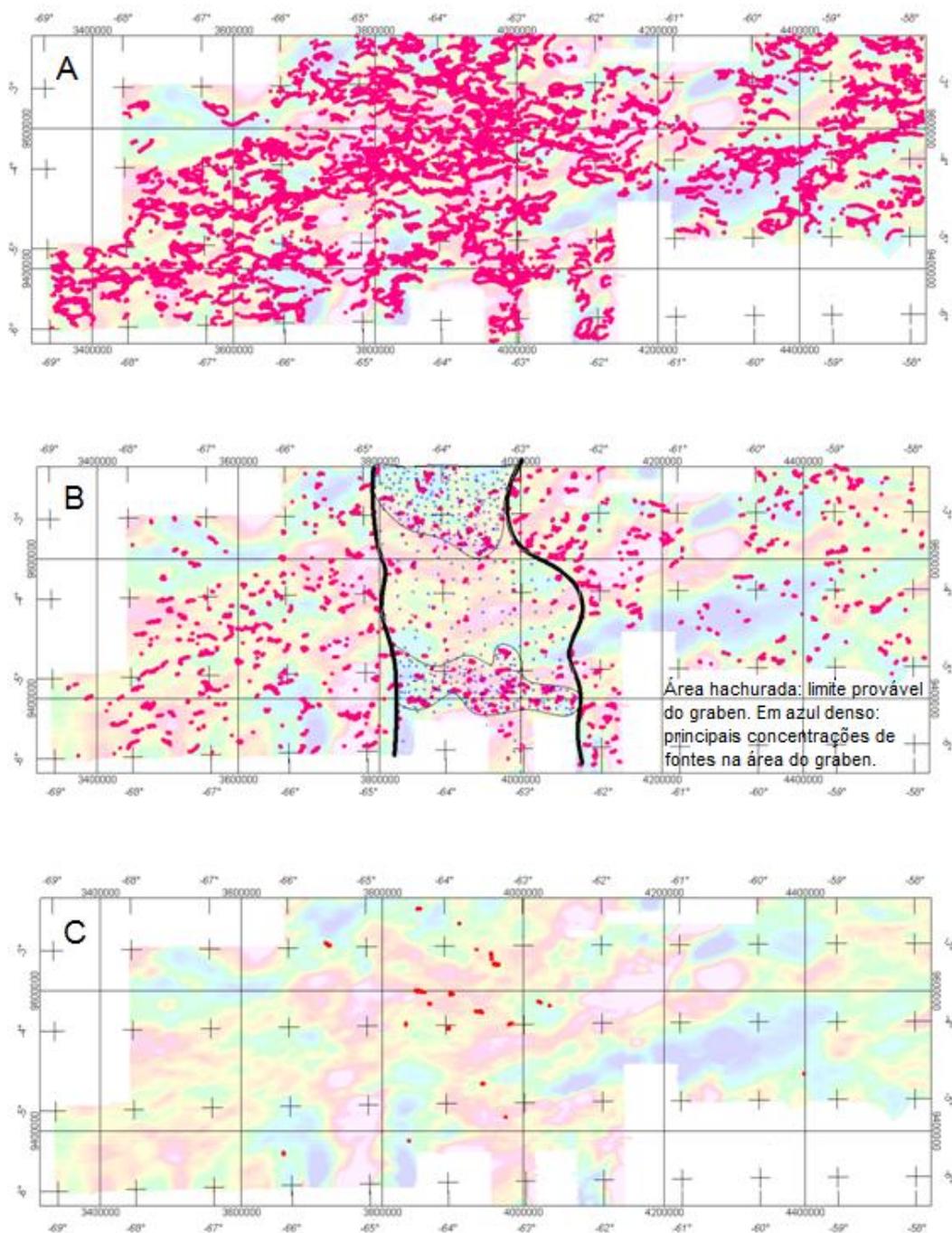


Figura 6.7 - Fontes magnéticas rasas ($> - 2$ km), obtidas com a deconvolução de Euler, com janela quadrada de 20 km de lado, para diques e soleiras (A), falhas de grande rejeito (B) e chaminés (C).

6.3 – Interpretação integrada dos dados magnéticos

O uso dos mapas de derivadas tem se revelado de grande ajuda na interpretação de dados dos métodos potenciais. Levando-se em consideração o modelo já explanado, onde, aliado à deconvolução de Euler, buscou-se uma suavização do sinal, pretende-se agora enriquecê-lo, através da visualização das seguintes feições: limites do gráben, das linhas de charneiras principais das duas bacias, das zonas de cisalhamento, incluindo o megacisalhamento do Solimões, da faixa de dobramentos escalonados “*en échelon*” da Bacia do Solimões e de seu prolongamento em direção ao eixo do Arco Purus. Além disso, será discutido o controle estrutural dessas feições, reveladas pela magnetometria, sobre a drenagem atual do próprio Rio Solimões.

A Figura 6.8 mostra o mapa da inclinação do sinal analítico magnético *tilt derivative*, sobre o qual, de forma esmaecida, na Figura 6.9, colocou-se a interpretação integrada dos dados. Tal interpretação baseou-se nos lineamentos e padrões magnéticos, alguns dos quais só delineados com a ajuda das figuras 6.4 e 6.5, esclarecedoras das estruturas geológicas mais profundas. A aplicação deste filtro foi feita sobre os dados do campo total magnético, reduzido do IGRF, como mostrados na Figura 4.5.

As feições magnéticas mostram tendências predominantes segundo ENE-WSW, com inflexões para NE-SW na parte norte da área. Secundariamente, porém bem marcantes e lineares, ocorrem também na direção NW-SE. Existem ainda feições E-W, porém de menor magnitude. As feições ENE-WSW, de caráter regional, têm grande comprimento de onda e refletem as direções preferenciais do substrato gnáissico-granítico da Província Rio Negro-Juruena, de Cordani e Brito Neves (1982). As feições NW-SE, com variantes para WNW-ESE, cortam e deslocam os lineamentos regionais do substrato.

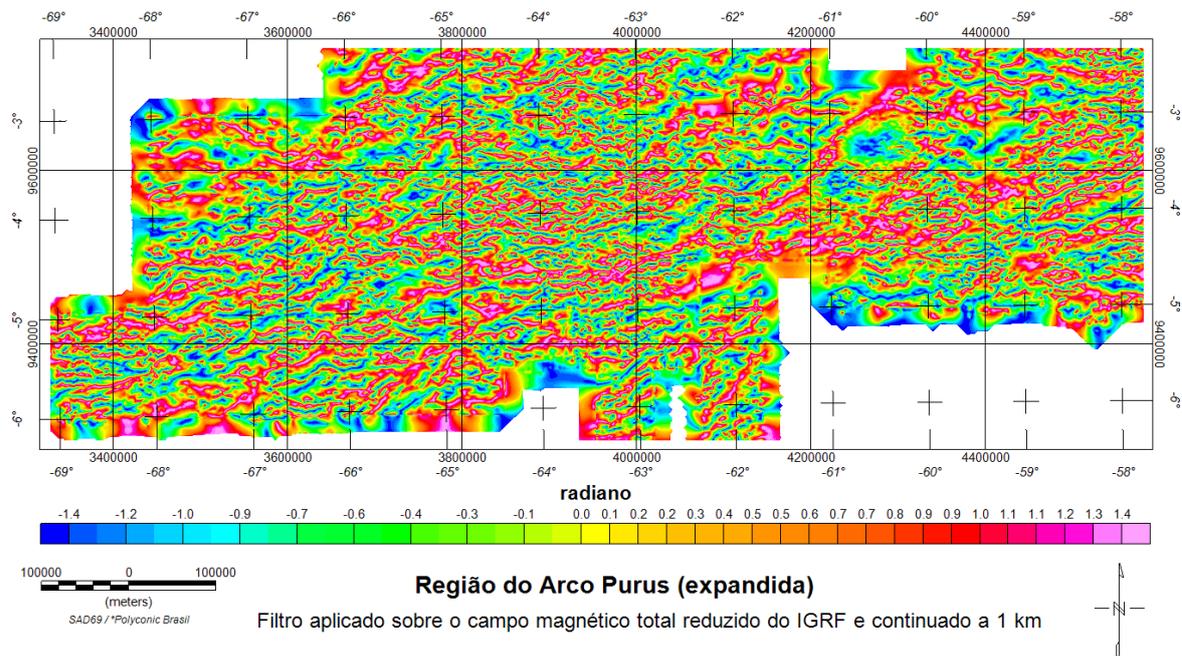


Figura 6.8 - Mapa da inclinação do sinal analítico magnético da região do Arco Purus

O Gráben do Purus, estendendo-se por toda área com direção geral N-S e largura aproximada de 300 km, é o principal dos “rifts” pré-cambrianos que ocorrem sotopostos à sub-bacia do Juruá (Figura 2.4). Eles se formaram provavelmente pelo alívio dos esforços tectônicos resultantes da junção das placas Guaporé e São Francisco, durante a etapa 1 da consolidação da Plataforma Sul-Americana, segundo Almeida (1967). Nos extremos norte e sul, onde o embasamento tende a aflorar, seus limites ficam mais difusos, como mostram os resultados da deconvolução de Euler e da continuação para cima. As grandes profundidades atingidas pelo *gráben*, bem como sua direção geral N-S, são fatores limitantes na detecção do mesmo através da magnetometria.

O Arco Purus, como definido por Morales (1959) e confirmado por sísmica e perfurações, corresponde ao limite leste do *gráben*. O topo da Formação Prosperança no furo 2-PUST-01, próximo deste limite, fica em 1138 m, e no furo 1-IA-01, a 1914 m (Figura 3.2). Tal resultado indica um mergulho em torno de 0,1° para W.

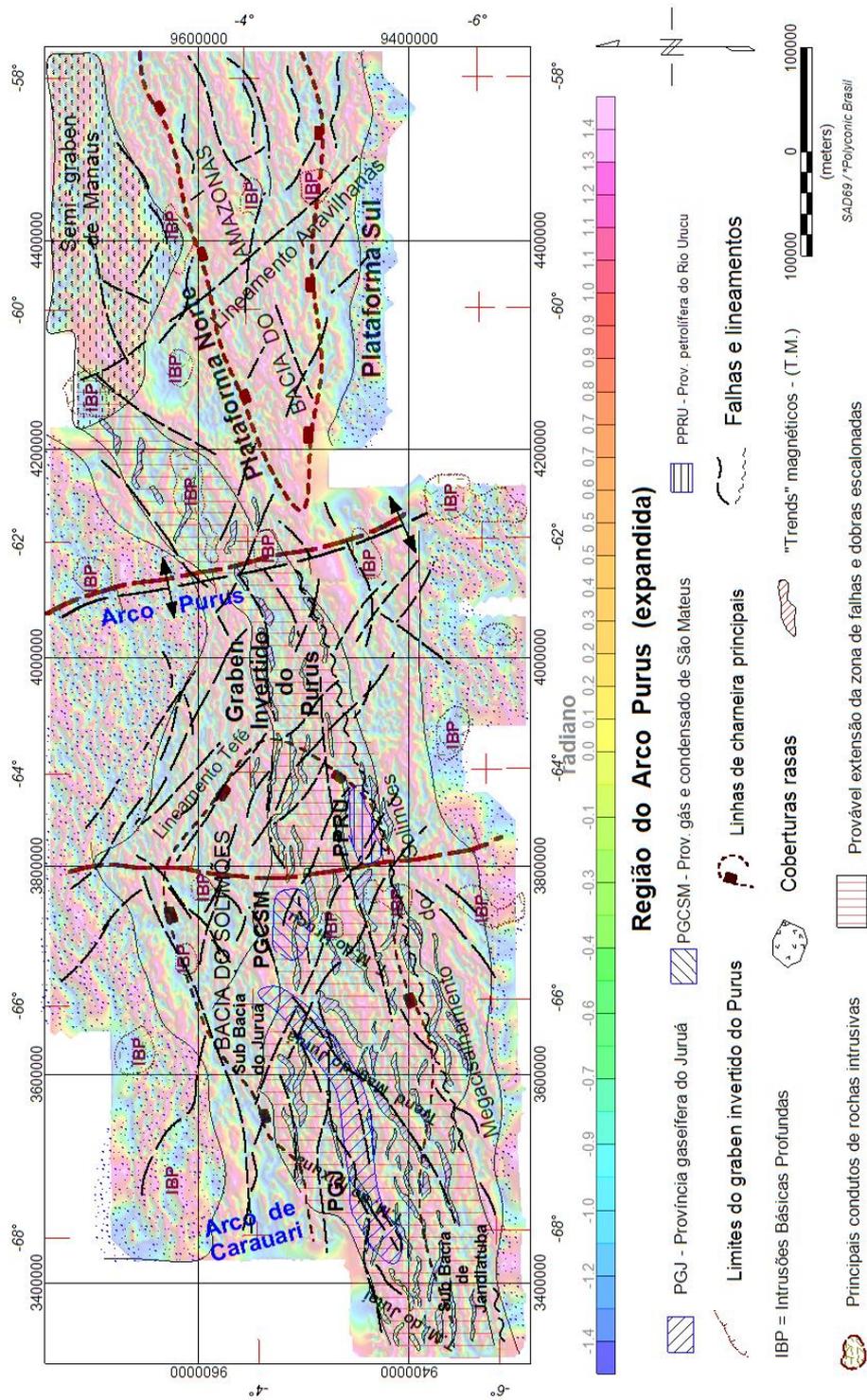


Figura 6.9 - Interpretação estrutural sobre o mapa da inclinação do sinal analítico magnético.

Esta formação é do Pré-Cambriano Superior ou Paleozóico Inferior, segundo Schobbenhaus e Neves (2003), e completa a consolidação do que viria a ser a Plataforma Sul-Americana, até então, parte integrante do super-continente Pangea.

Após a consolidação desses processos, um grande período erosivo se instala (etapa 2 de Almeida, 1967), propiciando a inversão do relevo e formação do Arco Purus. Assim, quando teve início a deposição dos sedimentos nas bacias do Solimões e do Amazonas, as mesmas já se encontravam separadas, com desenvolvimentos geológicos distintos, porém paralelos, devido às condições paleo-geográficas semelhantes.

Em seguida a este período erosivo que inverteu o *gráben* e expôs o Arco Purus, um período de expansão crustal (N-S) propiciou a formação das bacias do Amazonas e do Solimões (etapa 3 de Almeida, 1967), tendo a região do *gráben* funcionado como um núcleo mais resistivo, pois não são conhecidos sedimentos pré-pensilvanianos sobre o arco. Na Bacia do Amazonas, o estiramento foi maior, permitindo a ascensão do manto ao longo da calha, em grande extensão, com espesso desenvolvimento do pacote sedimentar (que chega a mais que 5500 m na parte leste da área), linhas de charneiras melhor definidas e contatos com as rochas do embasamento mais verticalizados, permitindo uma melhor definição no mapa reduzido ao pólo (Figura 6.3). Por outro lado, no mapa Bouguer (Figura 6.2), devido à forte influência da ascensão do manto, a situação é invertida. Na Bacia do Solimões, não há tal facilidade na interpretação, pois a mesma é mais rasa (ver Figura 6.3), apresentando menores mergulhos do contato embasamento-sedimento. No Mesozóico, porém, como resultado do magmatismo Penatecaua, uma nova assinatura magnética veio se somar à já existente, formada desde os tempos pré-cambrianos.

Este magmatismo, de idade neo-triássica a eo-jurássica, já componente dos esforços tectônicos que levaram à primeira quebra do Pangea, separando a Laurásia (América do Norte, Europa e Ásia), do Gondwana (América do Sul, África, Antártica, Austrália e Índia), promoveu a intrusão de várias chaminés, principalmente ao longo das ombreiras do Gráben Purus, além das soleiras e diques que ocorrem

nas bacias. Derrames basálticos não são conhecidos na região e isto se deve ao fato do extenso período erosivo lá atuante desde o Permiano Inferior até o Cretáceo Superior, que precedeu a deposição da Formação Alter do Chão. No final do Jurássico e início do Cretáceo, começa a reativação Wealdeniana (etapa 4 de Almeida, 1967), com esforços intra-placa provenientes da região andina, que provocaram a zona do megacisalhamento do Solimões e dobras escalonadas associadas, armazenadoras de óleo, gás e condensado (Figura 6.10). Esta reativação tem sido renovada nos dias atuais, como se verá no próximo item, e a presença do Arco Purus, dos *rifts* a ele associados e dos diferentes estilos dos dobramentos Juruá impuseram diferentes padrões magnéticos à assinatura adicionada no início do Mesozóico.

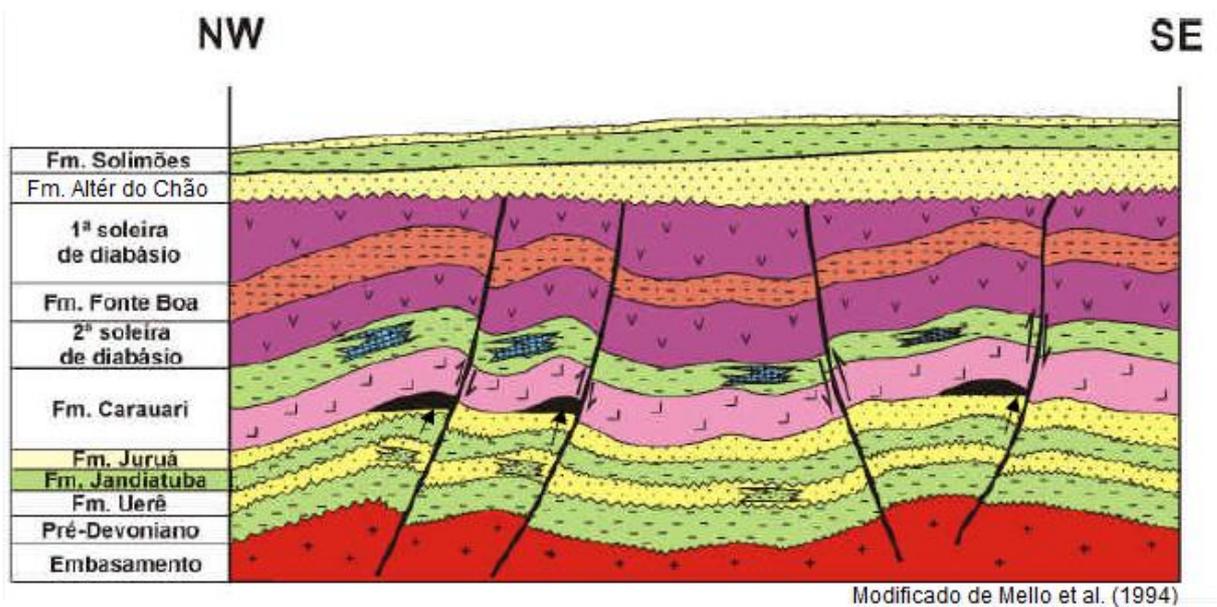


Figura 6.10 - Modelo de acumulação de hidrocarbonetos na Bacia do Solimões: soleiras dobradas concordantes com o pacote sedimentar (Orogênese Juruá).

As soleiras, por si mesmas, não apresentam uma direção preferencial e normalmente produzem anomalias magnéticas de alta frequência de formatos arredondados não orientados. No caso da área trabalhada, os esforços compressivos provenientes da cadeia andina, bem como os dobramentos devidos à Orogênese Juruá, impuseram aos diabásios direções preferenciais. Tais *trends* podem ser seguidos nos mapas magnéticos e servir como ferramenta auxiliar de grande valia no esforço exploratório, visto que os diabásios se dispõem concordantemente com os arenitos (reservatórios) e evaporitos (selantes) da Bacia do Solimões.

A parte superior da Figura 6.11, mostra os campos de óleo e gás na Bacia do Solimões e suas relações com as estruturas em subsuperfície, mapeadas pela sísmica, com forte controle de furos de sondagem, segundo Barata e Caputo (2007) e Eiras (1999). A parte média da figura, é um detalhe do mapa da inclinação do sinal analítico magnético, e a parte inferior mostra o mesmo mapa esmaecido, com o traçado dos *trends* magnéticos principais, em linha mais grossa, correspondendo aos eixos de anticlinais, onde se localizam as melhores trapas estruturais conhecidas, e em linha mais fina, os *trends* secundários, perpendiculares aos primeiros, provavelmente associados à falhas ou diques.

A Figura 6.12 é uma interpretação da linha 392 (localização na Figura 6.11C), apresentada por Pietrobon (2006), como apoio ao modelamento sísmico realizado na zona das dobras “en échelon”. No topo da Formação Caruari, as fortes anomalias de amplitude correspondem às soleiras de diabásio. O seu comportamento estrutural como mostrado nesta seção sísmica, bem como na seção geológica da Figura 6.10 é a causa das fortes anomalias evidenciadas na Figura 6.11. A resolução nos dois métodos é bastante diferente e, certamente, cada anomalia representada na Figura 6.11 é causada pela soma de vários corpos identificados na Figura 6.12. Fica, porém, evidenciado, que o rastreamento destas soleiras, através de um levantamento aeromagnético de alta resolução, sem dúvida agregará um valor inestimável na exploração de novos “plays” exploratórios, visando altos estruturais da Formação Juruá, principal reservatório do sistema petrolífero em foco.

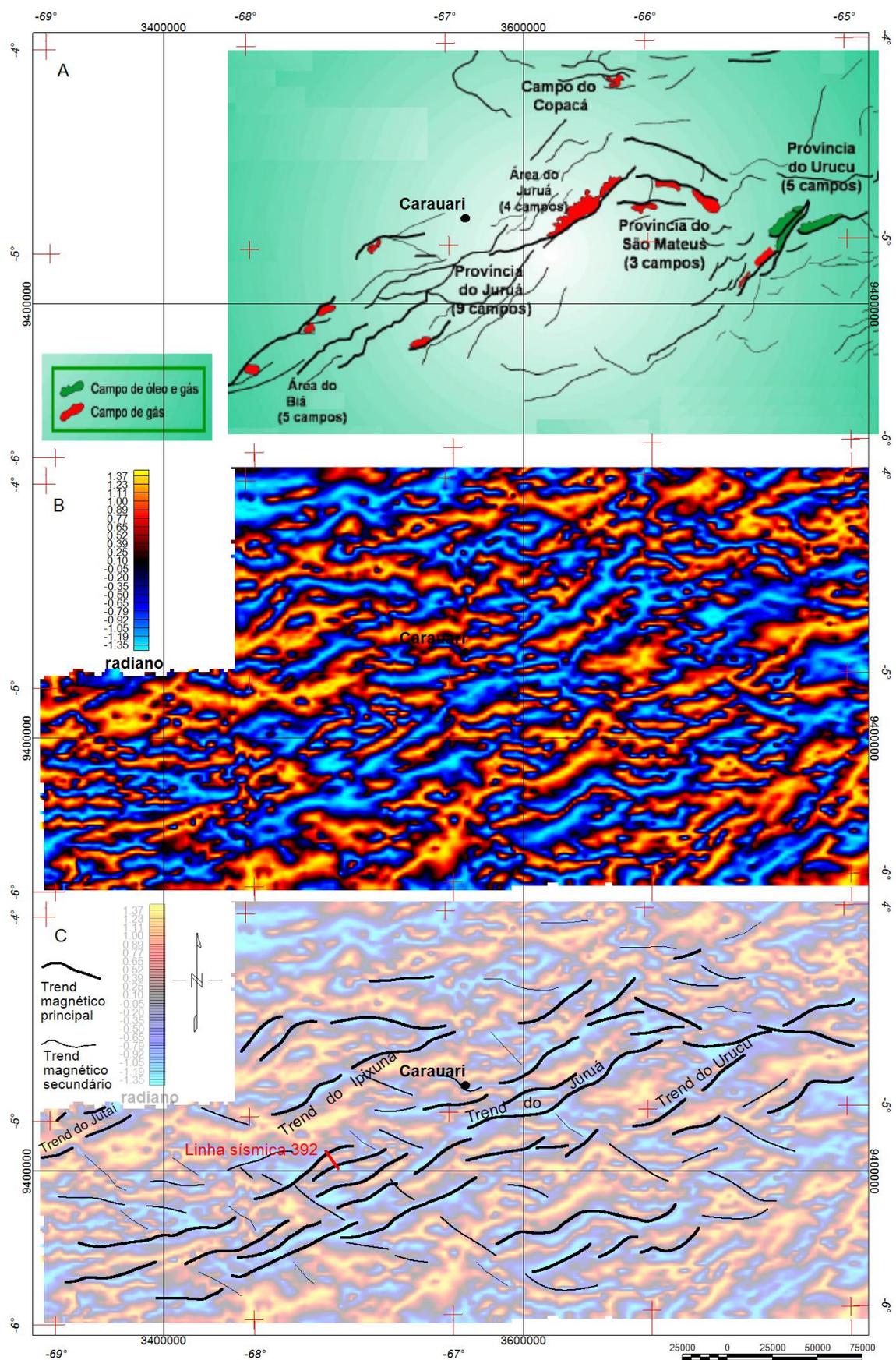


Figura 6.11 - Comparação entre trends estruturais conhecidos e trends magnéticos: (A) trends mapeados por sísmica e comprovados por poços (Eiras, 1999; Barata e Caputo, 2007); (B) Mapa da inclinação do sinal analítico; (C) trends magnéticos principais (prováveis eixos de anticlinalis em soleiras) e secundários (falhas, diques ou terminações de soleiras).

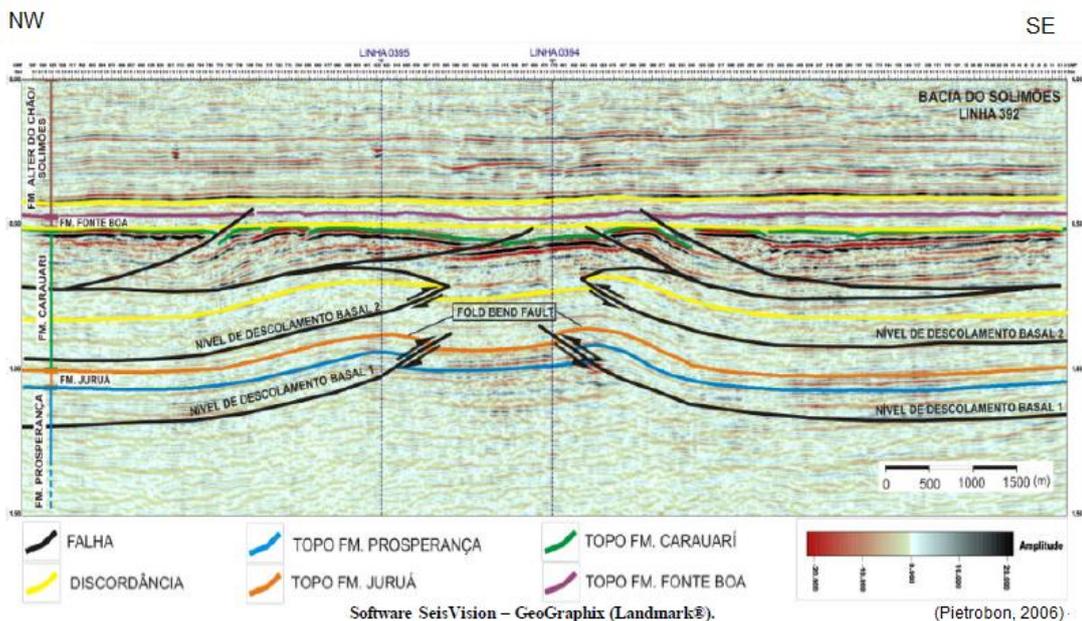


Figura 6.12 - Linha sísmica 392 interpretada, evidenciando as soleiras dobradas e falhadas, que propiciaram a formação de anomalias magnéticas de alta frequência.

6.4 – Evidências de neo-tectonismo

Atividades neo-tectônicas (Mioceno ao Recente) na região amazônica têm sido relatadas por diversos pesquisadores, desde Sternberg (1950) até os mais recentes, como Costa *et al.* (2001), Saadi *et al.* (2002), Silva (2005), Igreja (2007), Almeida-Filho e Miranda (2007), entre outros. Esses relatos baseiam-se principalmente em aspectos geomorfológicos, como extensos trechos lineares de rios, captura e inversão de drenagem, formas de lagos e ilhas, formação de falésias e registros de terremotos como o de 1983, que atingiu a magnitude de 5,5, segundo dados do Observatório de Brasília. Berrocal *et al.* (1984) fazem um levantamento da atividade sísmica no Brasil e o Observatório Sismológico da Universidade de Brasília vem monitorando essas atividades desde 1968. A Figura 6.13 mostra um resumo destas observações.

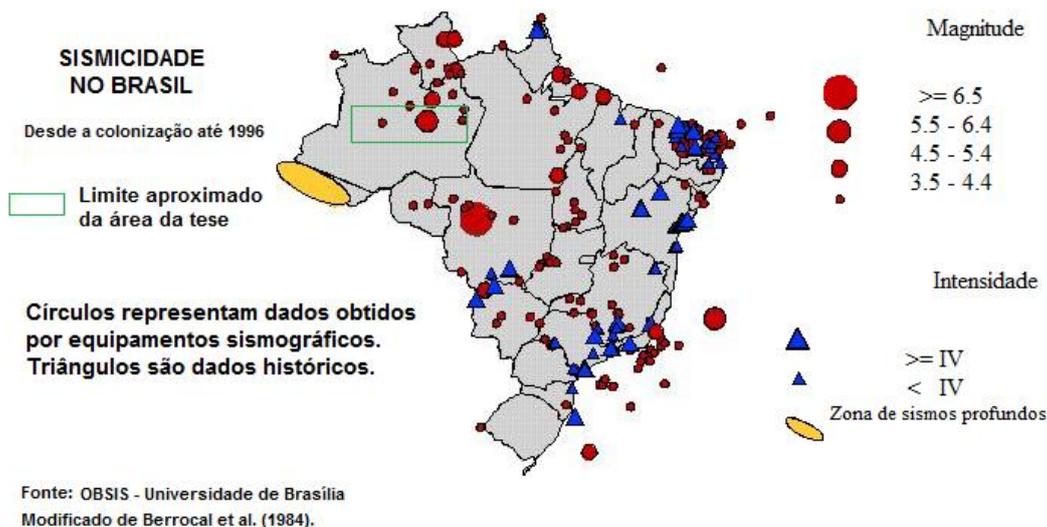


Figura 6.13 - Epicentros de Terremotos no Brasil.

Durante a interpretação dos dados aeromagnéticos, observou-se uma forte correlação entre os grandes lineamentos magnéticos e as formas de relevo atuais que estão sendo modeladas segundo o nível de base imposto pelo Rio Solimões.

Na presente dissertação foi comparado o mapa de razão das primeiras derivadas do campo magnético (*tilt derivative*, Figura 6.8), que realça bem esses lineamentos, com o modelo digital de elevação obtido com dados públicos do SRTM ⁽⁶⁾ (*Shuttle Radar Topographic Mission*, Figura 6.14). Verificou-se que, neste nível de escala regional, o leito principal do Solimões-Amazonas, seus principais afluentes e grandes superfícies de aplanamento são controlados por falhas pré-existentes, atualmente em processo de reativação como resultado de esforços intra-placa originados na região andina e sub-andina.

⁽⁶⁾ Dados obtidos através do servidor DAP da Geosoft em <http://www.geosoft.com>

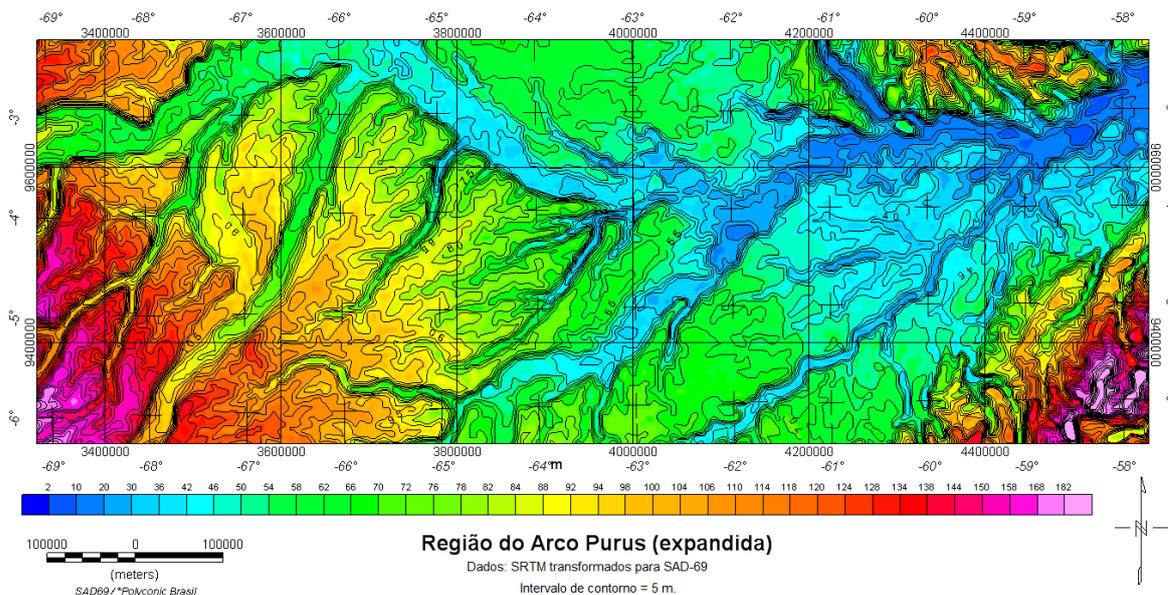


Figura 6.14 - Relevo topográfico da região estudada.

A Figura 6.15 traz a mesma base topográfica, porém esmaecida e com menos detalhes, sobre a qual se colocou parte dos elementos da interpretação da Figura 6.9, de modo a realçar as evidências de neotectonismo na região.

Miranda (1984), já mostrou o significado das anomalias morfoestruturais da drenagem na região do Rio Juruá, interpretando imagens de radar. Conseguiu separar 23 anomalias, classificando-as como domos ou depressões estruturais e, por comparação com dados geofísicos existentes (sísmicos ou magnéticos do Projeto Carauari), aventou a possibilidade de controle estrutural causado por irregularidades no substrato cristalino, nas áreas em que o embasamento apresentava profundidade menor que 1600 m.

O Rio Solimões atravessa toda parte norte da área estudada e, para melhor descrição do seu comportamento frente aos grandes lineamentos geo-magnéticos, foram colocados sete pontos (de A até G) ao longo do mapa (Figura 6.15). Ressalte-se que, em todo esse trecho, o rio corre sobre sedimentos não consolidados da Formação Solimões, sobrepostos aos da Formação Alter do Chão, perfazendo, ambas, algumas centenas de metros de espessura.

O trecho A-B, com direção NE, está fora da área dos quatro projetos aerogeofísicos estudados (Figura 1.2), mas o seu paralelismo com a principal linha de charneira da borda NW da Bacia do Solimões, bem como com dados fornecidos pelo EMAG2 (início deste capítulo e Figura 6.5), são fortes indicativos de controle tectônico. No ponto B, o rio encontra o que estamos denominando de Lineamento Tefé, mudando então o seu curso para SE e se encaixando neste lineamento por cerca de 250 km. Numa escala continental, o rio corre em meandros devido ao seu baixíssimo gradiente (2 cm por km de Benjamim Constant ao Atlântico). Entretanto, no trecho B-C, o seu vale é retilíneo, com o meandramento do rio, a ele circunscrito. As desembocaduras dos rios Juruá e Tefé formam grandes lagos devido a diferenças de pressão hidrostática. O Lineamento Tefé controlou também a sedimentação paleozóica da Bacia do Solimões, pois forma a linha de charneira principal de sua borda NE, que, inclusive, secciona o Gráben Purus. Vários outros lineamentos paralelos ao do Tefé estão assinalados na área SW da Figura 6.15 e controlam a incisão de vales fluviais nas diferentes superfícies de aplanamento regional, como melhor evidenciado na Figura 6.14.

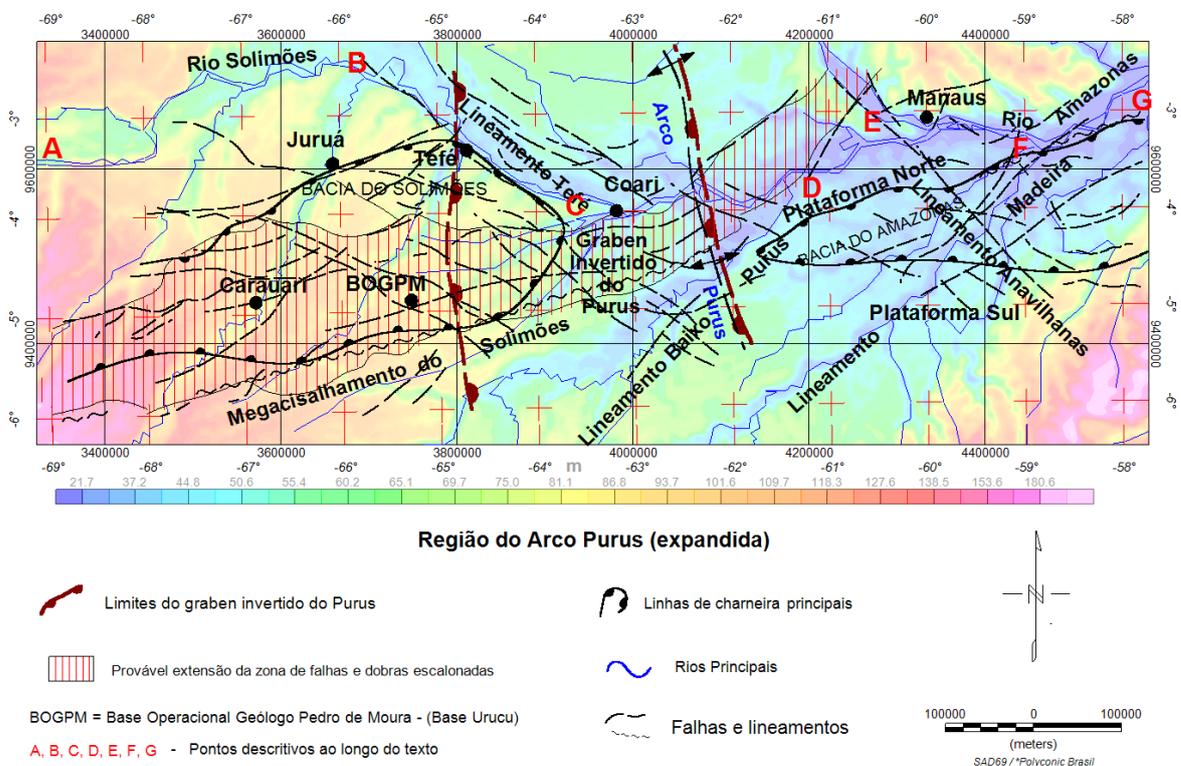


Figura 6.15 - Hidrografia, topografia e principais estruturas magnéticas reativadas neotectonicamente.

Um pouco a jusante do ponto C, o rio atinge a zona de dobramentos e falhamentos escalonados associada ao mega-cisalhamento do Solimões, formando o grande Lago de Coari na foz com o Solimões, onde deságuam o Urucu e o Coari. O trecho C-D tem direção W-E, mas o grande rio, a partir deste ponto, segue para NE seguindo o contato N desta zona, até o cruzamento com o Arco Purus, que lhe imprime uma resistência, obrigando-o a seguir para SE, cruzando esta zona até seu limite sul. Este percurso é pequeno, pois o lineamento Baixo Purus (NE-SW), o faz voltar a correr para NE, já no trecho assinalado como D-E.

Na região do ponto E, o Solimões, que vinha correndo no rumo NE, controlado pelo lineamento Baixo Purus, encontra o Rio Negro, controlado, no seu baixo curso, pelo lineamento Anavilhanas. A resultante destas forças impõe um fluxo para leste, até o ponto F, onde o Rio Madeira lhe confere outro direcionamento, agora para NE. O lineamento do Rio Madeira, com direção NE-SW tem provavelmente sua gênese relacionada à colisão entre as placas de Nazca e da América do Sul. Por outro lado, a drenagem do Rio Negro deve estar subordinada às interações entre a placa Sul-Americana e a do Caribe, que provocaram levantamentos no escudo das Guianas.

O Arco Purus se comporta, pois, como um divisor entre as forças neotectônicas atuantes no vale amazônico. A oeste do mesmo, elas são comandadas pelo encontro entre as placas de Nazca e Sul-Americana, que se deslocam a razão de 7,3 cm/ano (Press *et al.*, 2006). A leste, esta placa interage com a do Caribe. A partir do Arco de Gurupá (já na região da Ilha de Marajó), após certa influência da placa do Caribe, o neotectonismo é totalmente dependente de forças distensivas relacionadas com a abertura do Atlântico.

Capítulo 7

Conclusões e Recomendações

A interpretação dos dados aeromagnéticos da região do Gráben Purus, mesmo apresentando sérias limitações na fase de aquisição, permitiu um avanço significativo na definição e delimitação desta mega-feição estrutural.

O Grupo Purus foi depositado no Proterozóico Superior, em um gráben principal, com direção geral N-S, tendo a sedimentação ultrapassado as suas bordas. Posteriormente soerguido e falhado, agora segundo a direção E-W, tal feição condicionou o desenvolvimento no Paleozóico das bacias do Solimões a oeste e do Amazonas a leste, tendo servido como barreira até o Pensilvaniano. Assim, o comportamento do Gráben Purus evidencia seu caráter invertido, tendo o mesmo funcionado como arco delimitador das bacias citadas desde o Ordoviciano. Sua borda oriental corresponde ao eixo do Arco Purus.

As rochas que compõem o Grupo Purus e as que compõem as bacias sedimentares do Solimões e do Amazonas não apresentam contrastes marcantes de susceptibilidade magnética ou de densidade. Tal contraste, porém, ocorre em relação ao embasamento cristalino. Assim, foi possível delimitar-se, na região central do Gráben Purus, uma área com falta de massa (anomalia gravimétrica negativa), e maiores profundidades das fontes magnéticas (embasamento cristalino mais fundo).

Embora sua direção, predominantemente N-S, e sua localização, em região de baixa latitude magnética, dificultem sobremaneira a detecção do Gráben Purus pela magnetometria, as intrusões básicas do Magmatismo Penatecaua, na forma de chaminés ao longo das ombreiras do gráben, propiciaram uma melhor delimitação dos seus limites.

Mesmo parecendo contraditório, a continuação para cima, junto com a redução ao pólo e a deconvolução de Euler se mostrou eficaz para contornar os citados problemas e definir os limites do gráben, adicionando ainda informações sobre o seu comportamento estrutural com as maiores profundidades na parte central, o que é comprovado com os escassos dados gravimétricos existentes.

Com a aplicação desses filtros, o Gráben Purus se revelou como uma grande estrutura aproximadamente N-S, com feições magnéticas mais suavizadas, se estendendo pela região de estudo, com cerca de 250 a 300 km de largura. Foi possível também identificar a área de maior espessura do Grupo Purus no interior do gráben.

A determinação de fontes magnéticas com a deconvolução de Euler mostrou claramente a região do gráben invertido do Purus como unidade geomagnética distinta das regiões a oeste (bloco Solimões) e a leste (bloco Amazonas). Tanto na parte norte como na parte sul do gráben, existem “pontes” ligando os blocos oeste e leste. Entretanto em sua parte central, há uma escassez de fontes magnéticas, indicando um maior desenvolvimento do pacote metassedimentar do Grupo Purus ou sedimentar paleozóico da Bacia do Solimões, o que é confirmado pelos dados gravimétricos. Nos extremos norte e sul, onde o embasamento tende a aflorar, seus limites ficam mais difusos.

Várias reativações tectônicas afetaram o Gráben Purus, culminando com a Orogênese Juruá (Jurássico). Neste episódio, o Arco Purus serviu como anteparo ou pelo menos, como refrator dos esforços cisalhantes. Tal reativação tem sido renovada nos dias atuais. Assim, a presença do Arco Purus, e do gráben a ele associado se tornaram fatores preponderantes na formação das diferentes assinaturas magnéticas apresentadas pelas bacias e pelo próprio gráben.

Um aumento da resposta das altas frequências, através da utilização da inclinação do sinal analítico (ou razão da primeira derivada vertical pela primeira derivada horizontal do campo magnético) mostrou um forte paralelismo das feições

magnéticas, com os *trends* estruturais, já mapeados, que controlam as províncias produtoras de óleo e gás na Bacia do Solimões.

Esses *trends* magnéticos avançam sobre a região interpretada nesta tese, como a do gráben do Purus, chegando até a ultrapassar o eixo do Arco Purus, porém de forma bem mais atenuada, passando sua direção de ENE para NE, já em área rasa, conhecida como Plataforma Norte da Bacia do Amazonas.

Durante a interpretação dos dados aeromagnéticos, verificou-se uma forte correlação entre os grandes lineamentos magnéticos e as formas de relevo atuais que estão sendo modeladas segundo o nível de base imposto pelo Rio Solimões, que atravessa toda a parte norte da região investigada. Tal resultado foi fruto da comparação do mapa de razão das primeiras derivadas do campo magnético (*tilte derivative*), que realça bem esses lineamentos, com o modelo digital de elevação da SRTM (*Shuttle Radar Topography Mission*), sendo um forte indicativo de atividade neotectônica na região.

Do ponto de vista metodológico, pode-se afirmar que os dados magnéticos mais antigos, das décadas de cinquenta e início de sessenta, tendo sido obtidos por redigitalização, perderam muito de suas freqüências originais. Aqueles obtidos nos projetos mais novos (Coari e Carauari), na década de oitenta, devido aos fortes puxamentos, tiveram que passar por um rígido micronivelamento, perdendo também parte das informações neles contidas, principalmente as de alta freqüência. O resultado obtido com a técnica de decorrução, entretanto, foi satisfatório, permitindo o reconhecimento dos limites estruturais do Gráben Purus. Isso ocorreu mesmo com as limitações adicionais da localização próxima ao equador magnético e do forte sinal proveniente das soleiras de diabásio, que mascara o já fraco sinal referente ao contato profundo entre rochas com diferentes susceptibilidades magnéticas do embasamento cristalino e do Grupo Purus.

Deve-se levar ainda em consideração o longo tempo decorrido da aquisição dos dados aeromagnéticos estudados, sendo da ordem de 50 anos para os projetos Manaus Oeste e Manaus Leste, e de 30 para os projetos Coari e Carauari.

Posicionamento pouco preciso, através de estações SHORAN, baixa precisão dos magnetômetros, pequena eficiência dos compensadores e, principalmente, o grande espaçamento entre as linhas de vôo, em geral de 4 km, são fatores limitativos na interpretação.

Na gravimetria, a falta de uma malha regular e o grande espaçamento entre os perfis, realizado ao longo dos principais rios, não permitiu obter-se resposta de fontes situadas na parte mais superior da crosta, objeto desta tese. Porém, foi possível se vislumbrar o grande baixo tectônico na região central do gráben do Purus.

No atual nível de conhecimento, é sugerido um levantamento ao nível regional de semi-detilhe com linhas de vôo espaçadas de 0,5 km utilizando compensadores digitais automáticos, posicionamento por DGPS, magnetômetros de alta resolução (0,05 nT) e outras características dos modernos aerolevantamentos, em toda região estudada.

Outra opção ainda mais eficaz seria utilizar-se dois magnetômetros (gradiente vertical) e gravímetros acoplados. É bom lembrar que para minimizar (ou eliminar) a correção de Eötvös, nos levantamentos aerogravimétricos, a direção dos vôos deve ser N-S geográfica. Para levantamentos aeromagnetométricos a melhor direção é a N-S magnética, pois o sinal magnético é induzido mais fortemente nesta direção. A indicação para a altura dos vôos, nesses levantamentos, é que seja a mesma do intervalo entre as linhas de vôo.

Na Bacia do Solimões, foi vista a grande contribuição que os métodos magnéticos trouxeram e que poderão ainda trazer. Sugere-se para a região de dobras e falhas escalonadas "*en échelon*", linhas espaçadas de 200 m, com possível utilização de helicópteros, dependendo do relevo na região. E finalmente, sugere-se ainda, tornar praxe, a utilização de levantamentos gradiométricos, gravimétricos e magnetométricos terrestres, concomitante com os levantamentos sísmicos 3D.

8. Referências Bibliográficas

ALMEIDA, F. F. M. de, 1967, “Origem e Evolução da Plataforma Brasileira”, Boletim 241, DNPM / DGM.

ALMEIDA, F. F. M. de, 1969, “Diferenciação Tectônica da Plataforma Brasileira”, Anais do XXIII Congresso Brasileiro de Geologia, Salvador.

ALMEIDA, F. F. M. de, 1972, “Tectono-magmatic activation of the South American Platform and associated mineralization” in IUGS. Int. Geol. Congress, 24, Montreal, Actas, Section 3 – Tectonics, p. 339-346.

ALMEIDA, F. F. M. de, HASUI, Y., BRITO NEVES, B. B., FUCK, R.A. 1981, “Brazilian structural Provinces” , Earth Science Review, 17, p 1-19 in *Bizzi et al.* 2003.

ALMEIDA, F. F. M. de e CARNEIRO, C. D. R., 2004, “Inundações Marinhas Fanerozóicas no Brasil e Recursos Minerais Associados” – in Geologia do Continente Sul-Americano – Cap. 3 – p43-58.

ALMEIDA-FILHO, R., MIRANDA, F. P., 2007, “Mega capture of the Rio Negro and formation of the Anavilhanas archipelago, Central Amazonia, Brazil: Evidences in an SRTM digital elevation model”, Remote Sensing of Environment, 110, p. 387-392.

APOLUCENO NETO, A. F., TSUBONE, K., 1988, “A descoberta do petróleo do Rio Urucu, Bacia do Solimões” in Congresso Brasileiro de Geologia, 2, Belém, Anais SBG, 6, p. 2.416-2.427.

ARAÚJO, H. I. J., RODARTE, J. B. H., SANTOS, D. B., BARROS, A. M., TASSINARI, C. C. G., LIMA, M. I. C., ABREU, A. S., FERNANDES, C. A. C., 1978, “Geologia da Folha SB.20 – Purus” – Projeto RADAMBRASIL, vol 17, p. 19-128.

BAHIA, R. R., ABREU, F. A. M. (1985), "O Rift do Amazonas – Sistema Aulacogênico na Plataforma Amazônica", Anais II Simpósio de Geologia da Amazônia – SBG. p. 222-241.

BARATA, C. F., CAPUTO, M. V., (2007), "Geologia do petróleo da Bacia do Solimões. "O Estado da Arte", 4º PDPETRO – Campinas, SP - ABPG.

BEDEGRAL, R. P., (2005), "Modelagem quantitativa flexural e cinemática de bacias sedimentares", Tese de Doutorado, COPPE, UFRJ.

BENDER, A. A., EIRAS, J. F., WANDERLEY FILHO, J. R., BARBOSA FILHO, C. M.,(2001), "Quantificação 3D da evolução termal da bacia do Solimões e suas implicações petrolíferas", Simpósio de Geologia da Amazônia, 7. SBG.

BERROCAL, J., LADEIRA, E. A., FARIA, A., GALDOS, J., (1984), "Sismicidade no Brasil", IAG, USP, 320p.

BIZZI, L.A., SCHOBENHAUS, C., VIDOTTI, R. M., GONÇALVES, J. H., 2003, "Geologia, Tectônica e Recursos Minerais do Brasil", CPRM – Serviço Geológico do Brasil.

BLAKELY, R. J., HASSANZADEH, S., 1981 " Estimation of depth to magnetic source using maximum entropy power spectrum, with application to the Peru-Chile trench" in "Nazca Plate: Crustal Formation and Andean Convergence" , Geol. Soc. Am. Mem., 154.

BLAKELY, R. J., 1995, "Potential Theory in Gravity & Magnetism Applications" – Cambridge University, 441p.

BRANDÃO, J. S. A. L., FEIJÓ, F. J., 1994, "Bacia da Foz do Amazonas" – Boletim de Geociências da Petrobras, 8 (1), p 91-99.

BRANDÃO, J. A. S. e GUARDADO, L. R., (1998), "The petroleum exploration in Brazil", Searching for oil and gas in the land of giants – p. 3-14,. Petrobras – Schlumberger.

BRAZIL, I. R., 1989, "O Potencial Petrolífero e as Perspectivas Exploratórias da Bacia do Solimões" – I Seminário de Interpretação Exploratória – Petrobrás – Depex, p. 3-11.

BIZZI, L. A., VIDOTTI, R. M., 2003, "Condicionamento do magmatismo pós-Gondwana" in Bizzi *et al.* (2003), p. 335-361.

CAPUTO, M. V., 1984, "Stratigraphy, tectonics, paleoclimatology and paleogeography of northern basins of Brazil", University of Califórnia, Santa Bárbara, USA – Tese de doutorado, 586p. apud Bizzi *et al.* (2003).

CAPUTO, M. V., RODRIGUES, R., VASCONCELOS, D. N. N., 1972, "Nomenclatura estratigráfica da Bacia do Amazonas – história e atualização", 26º Cong. Bras. de Geol., v. 3, p. 35-46.

CAPUTO, M. V., SILVA, O. B., 1990, "Sedimentação e Tectônica da Bacia do Solimões", in Origem e Evolução de Bacias Sedimentares. – Rio de Janeiro – Petrobras.

CLARK, J., 2002, "Bacia do Solimões", IV Rodada de Licitações, ANP/SDB, Petrobrás, 38 p., apud Pietrobon, M. O. (2006).

CORDANI, U.G., NEVES, B.B.B., (1982), "The geologic evolution of South America during the Archean and Early Proterozoic", Rev. Bras. Geociências v.12, nº 1/2/3, p.78-88.

COSTA, J. B. S., BEMERGUI, R. L., HASUI, Y., BORGES, M. S., (2001), "Tectonics and paleogeography along the Amazon River", J. of South American Earth Sciences, v.14, p335-347.

CUNHA, P. R., GONZAGA, F. G., COUTINHO, L. F. C., FEIJÓ, F. J., 1994, “Bacia do Amazonas”, Boletim de Geociências da Petrobras, v. 8, n. 1, pp. 47-55.

EIRAS, J. F., 1996. “Influência tectônica do arco de Carauari na sedimentação fanerozóica da Bacia do Solimões, Norte do Brasil”. In: Congresso Brasileiro de Geologia, 39, Salvador. Anais, v. 1, pp. 50-53. Salvador : Sociedade Brasileira de Geologia.

EIRAS, J. F., 1998, “Tectonics, Sedimentation and Petroleum System of the Solimões Basin, Amazon State” – Geological Setting of Sedimentary Basins in Brazil – p 23-31. - Searching for oil and gas in the land of giants. Petrobras – Schlumberger.

EIRAS, J. F., 1999 “Geologia e sistemas petrolíferos da Bacia do Solimões”, VI Simpósio de Geologia do Amazonas, Manaus.

EIRAS, J. F., BECKER, C. R., SOUZA, E. M., GONZAGA, F. G., SILVA J. G. F., DANIEL, L. M. F., MATSUDA, N. S., FEIJÓ, F. J.. 1994. “Bacia do Solimões”, Boletim de Geociências Petrobras, v. 8, n. 1, pp. 17-45.

EIRAS, J. F., WANDERLEY FILHO, J. R., 2003, “Sistemas petrolíferos ígneo-sedimentares”, 2º Congresso Brasileiro de P&D em Petróleo e Gás. Rio de Janeiro.

ESTEVES, F. R., 1984, “Mecanismo das placas da América Central-Pacífico Sul e sua Influência na evolução tecto-sedimentar da Bacia do Alto Amazonas durante o Mesozóico”, PETROBRAS/DENOC, 14p – Relatório Interno (in Caputo *et al.* (1990).

GEOSOFT®, 2000, “2-D Frequency Domain Processing of Potential Field Data – Extension for Oasis Montaj v6.1” – Manual do Oasis Montaj – arquivo em pdf – p. 53-57.

GONÇALVES, F. T., GONZAGA, F. G. , COUTINHO, L. F. C., TRIGUIS, J. A., 1994 “Avaliação e modelagem geoquímica da bacia do Amazonas: Timing de geração e migração”, Petrobras, relatório interno, 118p. in Milani e Zalan (1998).

GONZAGA, F. G., GONÇALVES, F. T. T., COUTINHO, L. F. C., 1997, “Modelling of generation and migration in the Amazonas Basin, Brazil” in AAPG Hedberg Research Symposium on Petroleum Systems of the South Atlantic Margin – Extended abstract volume, Rio de Janeiro, Brasil, p 68-71.

GONZAGA, F. G., GONÇALVES, F. T. T., COUTINHO, I. E. C., 2000, “Petroleum geology of the Amazonas Basin, Brazil: modelling of hydrocarbon generation and migration”, AAPG Memoir 73, p. 159-178.

HANSEN, R. O., 2005, “3D multiple-source Werner deconvolution”, Geophysics, v.70, p. 45-51.

HARTMAN, R. R., TESKY, D. J., FRIEDBERG, L. L., 1971, “A System for Rapid Digital Aeromagnetic Interpretation”, Geophysics, v. 36, p. 891-918.

HOOD, P., 1965, “Gradient measurements in aeromagnetic surveying”, Geophysics, v.30, p.891-918.

HOOD, P., 1971, “Magnetic Survey Instrumentation – a review of recent advances” in The Geological Survey of Canada – Economy Geology Report, N° 26 – p 3-31.

IGREJA, H. L. S., 2007, ”Neotectônica: a importância para o bioma amazônico”, Workshop de Geotecnologias Aplicadas às Áreas de Várzeas da Amazônia – IBAMA, Sadeckgeo - CRA-INPE.

ISSLER, R.S., ANDRADE, A.R.F., MONTALVÃO, R.M.G. de, GUIMARÃES, G., SILVA, G. G., LIMA, M. I. C., 1974, “Geologia da Folha SA.22 – Belém” - Projeto RadamBrasil vol. 5.

KATZER, F., (1933), “Geologia do Estado do Pará”, Museu Paraense, Bol. v IX pp. 1-269 – Belém – apud Loczy, 1966.

KU, C. C., SHARP, J., 1983, “Werner Deconvolution for automatic interpretation and its refinement using Marquardt inverse modeling” , Geophysics, 48, p. 754-774.

LOCKZY, L. de (1966), “Contribuições à paleogeografia e história do desenvolvimento geológico da Bacia do Amazonas” – Bol. 223 – DNPM – DGM – 96p.

LOURENÇO, R. S., MONTALVÃO, R. M. G. de, PINHEIRO, S. S., FERNANDES, P. E. C. A., PEREIRA, E. R., FERNANDES, C. A. C., TEIXEIRA, W., 1978, “Geologia da Folha SA.20 - Manaus”, Projeto RADAMBRASIL, vol. 18, p. 19-164.

MACKENZIE, D. P., BICKLE, M. J., 1988, “The volume and composition of melt generated by extension of the lithosphere”. Journal of Petrology, 29 (3): p 625-679.

MAUS, S., BARCKHAUSEN, U., BERKENBOSCH, H., BOURNAS, N., BROZENA, J., CHILDERS, V., DOSTALER, F., FAIRHEAD, J., FINN, C., FRESE, B., GAINA, C., GOLYNSKY, S., KUCKS, R., LUHR, H., MILLIGAN, P., MOGREN, S., MULLER, D., OLESEN, O., PILKINGTON, M., SALTUS, R., SCHREKENBERGER, B., THEBAULT, E., TONTINI, F., (2009), “EMAG2: A 2-arc-minute resolution Earth Magnetic Anomaly Grid compiled from satellite, airborne and marine magnetic measurements”. Journal of Geophysical Research, XXX, DOI:10.1029.

MELLO, M. R., KOUTSOUKOS, E. A. M., MOHRIAK, W. U., BACOCOLI, G., 1994, “Selected petroleum system in Brazil”, AAPG Memoir 60, Ch. 31, p. 499-512.

MILANI, E. J., THOMAZ FILHO, A., 2000 “Sedimentary Basins of South America” – in Tectonic Evolution of South America – 31st International Geological Congress – Rio de Janeiro p. 389-452.

MILANI, E.J. e ZALAN, P. V., (1998) “The Geology of Paleozoic Cratonic Basins and Mesozoic Interior Rifts of Brazil” – AAPG International Conference & Exhibition – Rio de Janeiro.

MILANI, E. J., 2004, “Comentários sobre a origem e a evolução tectônica da Bacia do Paraná”, - Evolução da obra de Fernando Flávio Marques de Almeida – Editora Beca.

MILANI, E. J., ZALAN, P. V., 1998, “The Geology of Paleozoic Cratonic Basins and Mesozoic Interior Rifts of Brazil”, AAPG International Conference & Exhibition.

MILLER, H.G., SINGH, V. J., 1994, “A new concept for location of potential field sources”, *Applied Geophysics*, v.32, p.213-217.

MINTY, B. R. S., 1991, “Simple micro-levelling for aeromagnetic data”, *Exploration Geophysics*, v.22, p. 591-592.

MIRANDA, F. P., 1984, “Significado geológico das anomalias morfoestruturais da Bacia do Alto Amazonas”, *Anais do II Symposium Amazônico – Manaus*.

MIZUSAKI, A. M. P., THOMAZ FILHO, A., CASERO, P. de, 1998, “Ages of the magmatism and the opening of the South Atlantic Ocean”, *Pesquisas*, 25 (2):45-57 (in Thomaz Filho *et al.* 2008).

MONTALVÃO, R. M. G. de, BEZERRA, P. E. L., 1980 “Geologia e Tectônica da Plataforma (Craton) Amazônica (Parte da Amazônia Legal Brasileira) – *Rev. Bras. Geociências*, vol. 10, No 1 – Mar 1980.

MORALES, L. G. (1959) “Geology & Oil Possibilities of Amazonas Basin” – Fifth World Petroleum Congress (in Lockzy, 1966).

NABIGHIAN, M.N. ,1972, "The analytic signal of two dimensional magnetic bodies with polygonal cross section: its properties and use for automated anomaly interpretation" , Geophysics, v. 37, p. 507-517.

NABIGHIAN, M.N. ,1974, "Additional comments on the analytical signal of two dimensional magnetic bodies with polygonal cross section", Geophysics, v. 39, p. 85-92.

NABIGHIAN, M.N. ,1984, "Toward a three-dimensional automatic interpretation of potential field data via generalized Hilbert transform: Fundamentals relations", Geophysics, v. 49, p. 780-786.

NAUDY, H., 1971, "Automatic determination of depth on aeromagnetic profiles", Geophysics, v. 36 p. 717-722.

NAUDY, H., DREYER, H., 1968, "Non-linear filtering applied to aeromagnetic profiles", Geophysical Prospecting, v.16, p. 171-178.

NETTLETON, L.L., 1962, "Gravity and Magnetism for geologists and seismologists" Bull. AAPG, v.46, no 10, p.1.815-1.838.

NEVES, C. A. O., 1989, "O estado da arte: prospectos potenciais e áreas prioritárias para exploração na bacia do Amazonas", I Seminário de Interpretação Exploratória, Petrobrás, p. 13-23.

NUNN, J. A., AIRES, J. R., 1988, "Gravity Anomalies and Flexure of the Lithosphere at the Middle Amazon Basin, Brazil", Journal of Geophysical Research, vol 93, B1, 415-428.

O'BRIEN, D. P., 1972, "CompuDepth, a new method for depth-to-basement computation" in 42nd Annual International Meeting, Anaheim, CA, Society of Exploration Geophysics.

OLIVEIRA, D. C., 2005, “Alguns aspectos importantes sobre a evolução magmática de bacias sedimentares”, III Simpósio de Vulcanismo e Ambientes Associados – Cabo Frio, RJ.

OLIVEIRA, F. M., ARAÚJO, R. L., CARVALHO, J. S., COSTA, S. S., 2008, “Determinação da variação no microclima de Manaus-AM por atividades antropogênicas e modulações climáticas naturais” – Acta Amaz. vol. 38 nº4.

PAIVA, G. de, 1929, “Valle do Rio Negro; physiografia e geologia”, Bol. Serv. Geol. e Mineralógico, (40) : 1-62. *In* (Lourenço *et al.*, 1978).

PAIVA, G. de., 1929, “Valle do Rio Negro; physiografia e geologia” – Boletim do Serviço Geológico e Mineralógico, Rio de Janeiro 40, 62p, *in Montalvão et al.* (1980).

PIETROBON, M. O., 2006, “Modelo estrutural da sub-bacia do Juruá (Bacia do Solimões – AM), baseado em interpretações de dados sísmicos e influência da tectônica pré-andina na geração de trapas”, - Monografia de graduação em geologia – UNESP, 82 p.

PRESS, F., SIEVER, R., GROTZINGER, J., JORDAN, T. H., 2006, “Para Entender a Terra”, Bookman, Ciências da Terra - Geologia.

PRINZHOFER, A., BATTANI, A., SANTOS NETO, E. V., (2002), “Natural tracing of the accumulated hydrocarbons of the Solimões basin (Brazil)” Petrobras – Cenpes – Relatório interno - *in Wanderley Filho et al.* (2006).

QUADROS, L. P., 1988, “Zoneamento Bioestratigráfico do Paleozóico Inferior e Médio (seção marinha) da Bacia do Solimões” - *Bol. Geociências da Petrobrás*,– 1(2):95-109. Rio de Janeiro.

REID, A. B., ALSSOP, J. M., GRANSER, H., MILLET, A. J., SOMERTON, I. W., 1990, "Magnetic interpretation in 3-D using Euler deconvolution", *Geophysics*, vol. 55, p.80-91.

SAADI, A., MACHETTE, M. N., HALLER, K. M., DART, R. L., BRADLEY, L. A., SOUZA, A. M. P. D., 2002, "Map and database of Quaternary faults and lineaments in Brazil", USGS, Open-File Report 02-230.

SANTOS, D. B. dos, FERNANDES, P. E. C. A., DREHER, A. M., CUNHA, F. M. B. da, BASEI, M. A. S., TEIXEIRA, J. B. G., 1975, "Geologia da Folha Tapajós – SB.21" – Projeto RADAMBRASIL, vol. 7, p.15-99.

SCHOBENHAUS, C. e NEVES, B. B. de B., 2003, "Geologia Tectônica e Recursos Minerais do Brasil" – CPRM – Cap. 1, p.5-54.

SILVA, C. L., 2005, "Análise da tectônica cenozóica da região de Manaus e adjacências", IGCE – UNESP – Tese de doutorado.

SMELLIE, D. W., 1967, "Elementary approximations in aeromagnetic interpretation", *Mining Geophysics*, vol.2, p. 474-484 – Reprint from *Geophysics*, v.21, no.4, 1956.

SPECTOR, A., GRANT, F. S., 1970, "Statistical models for Interpreting Aeromagnetic data", *in Geophysics*, v. 35, p. 293-302.

STERNBERG, H. O. R., 1950, "Vales tectônicos da planície amazônica", *Rev. Bras. de Geografia*, v.4, p.3-26, *in Igreja*, (2007).

TAPLEY, B., RIES, J., BETTADPUR, S., GHAMBERS, D., CHENG, M., CONDI, F., GUNTER, B., KANG, Z., NAGEL, P., PASTOR, R., PEKKER, T., POOLE, S., WANG, F., 2005, "GGM02 – An improved Earth gravity field model from GRACE", *Journal of Geodesy*.

TELFORD, W. M., GELDART, L. P., SHERIFF, R. E., 1990, "Applied Geophysics", Cambridge University Press.

THOMAZ FILHO, A., MIZUSAKI, A. M. P., ANTONIOLI, L., 2008, "Magmatismo nas bacias sedimentares brasileiras e sua influência na geologia do petróleo", Rev. Brás. Geociências, 38 (2) p.128-137.

THOMPSON, D. T., 1982, "Euldepth – A New Technique for Making Computer-Assisted Depth Estimates from Magnetic Data", Geophysics, v.47, p.31-37.

TREITEL, S., CLEMENT, W. G., KAUL, R. K., 1971, "The spectral determination of depths to buried magnetic basement rocks", Geophys. J. Roy. Astro. Soc., v. 24 p. 415-429.

WANDERLEY FILHO, J. R., TRAVASSOS, W. A. S., ALVES, D. B., 2006, "O diabásio nas bacias paleozóicas amazônicas – herói ou vilão?", Bol. Geoc. da Petrobrás, v.14, No 1, p.177-184.

WERNER, S., 1953, "Interpretation of Magnetic Anomalies at sheet-like bodies", Sver. Geol. Undersok, ser. C. C. Arsbok, 43, N:06 (in Hartman *et al.* 1971).

WOOLARD, G. P., 1940, "The new gravity system – Changes in international gravity base and anomaly values". Geophysics, 41, 459-467.

ZALAN, P. V., 2004, "Evolução fanerozóica das bacias sedimentares brasileiras" in Geologia do Continente Sul Americano – Evolução da obra de Fernando Flávio Marques de Almeida – Editora Beca.