



UFRJ

Josenildo Vicente Firmino

APLICAÇÃO DO MÉTODO MAGNÉTICO NA EXPLORAÇÃO GEOFÍSICA

Estudo de caso: bacia Oriente, Equador

Trabalho de Conclusão de Curso submetido ao Programa de Pós-graduação em Geologia, Instituto de Geociências, da Universidade Federal do Rio de Janeiro – UFRJ, como requisito necessário à obtenção do grau de Especialista em Geofísica do Petróleo.

Orientadores:

Paula Lúcia F. da Rocha
Júlio César Soares de Oliveira Lyrio

Rio de Janeiro
Agosto de 2007

MGL
F525A

JOSENILDO, Vicente Firmino

Aplicação do Método Magnético na Exploração Geofísica:

Estudo de caso: bacia Oriente, Equador / Josenildo Vicente Firmino - - Rio de Janeiro: UFRJ / IGeo, 2007

92p. : il.; 30cm

Trabalho de Conclusão de Curso (Especialização em Geofísica do Petróleo) – Universidade Federal do Rio de Janeiro, Instituto de Geociências, Programa de Pós-graduação em Geologia, 2007.

Orientadores: Paula Lúcia F. da Rocha, Júlio César Soares de Oliveira Lyrio.

1. Geofísica. 2. Geologia de Engenharia e Ambiental – Trabalho de Conclusão de Curso. I. Paula Lúcia, F. da Rocha. II. Universidade Federal do Rio de Janeiro, Instituto de Geociências, Programa de Pós-graduação em Geologia. III. Título.

Josenildo Vicente Firmino

APLICAÇÃO DO MÉTODO MAGNÉTICO NA EXPLORAÇÃO GEOFÍSICA

Estudo de caso: bacia Oriente, Equador

Trabalho de Conclusão de Curso submetido ao Programa de Pós-graduação em Geologia, Instituto de Geociências, da Universidade Federal do Rio de Janeiro – UFRJ, como requisito necessário à obtenção do grau de Especialista em Geofísica do Petróleo.

Orientadores:

Paula Lúcia F. da Rocha
Júlio César Soares de Oliveira Lyrio

Aprovada em: dia.mês.2007

Por:

Nome do Orientador (UFRJ)

Nome do Orientador (Petrobras)

UFRJ
Rio de Janeiro
2007

À minha mãe Francisca Vicente Firmino (*in
memoriam*)

Agradecimentos

Ao fim deste trabalho são muitas as pessoas a quem agradecer.

Primeiramente a Petrobras pelo apoio sem o qual não teria sido possível a realização deste trabalho.

Ao Dr. John F. Ceron, da Ecopetrol, pelo material cedido e pela ajuda na realização deste trabalho.

Ao Júlio César Soares de Oliveira Lyrio pela ajuda na obtenção do material utilizado nesta monografia.

Ao coordenador do curso de Formação de Geofísicos Jr. da Petrobras, Álvaro Lúcio Gomez.

À Professora Paula Lúcia Ferrúcio da Rocha, da UFRJ, pela ajuda na aquisição do artigo usado no estudo de caso desta monografia.

Ao Professor Leonardo Borghi, da UFRJ, pelas correções feitas no material sobre a geologia da bacia utilizada nesta monografia.

Aos professores do curso de Formação de Geofísicos Jr. da Petrobras que contribuíram muito para o meu aprendizado na área de geofísica.

A todos os meus amigos do curso de formação de geofísicos da Petrobras, que foram como uma família para mim durante o longo período do curso no Rio de Janeiro.

Ao meu Pai, irmãos e irmãs e especialmente à minha noiva Raquel Lima, pelo apoio e carinho. E por terem compreendido meus momentos de ausência durante a realização deste trabalho.

Resumo

FIRMINO, Josenildo. **Aplicação do Método Magnético na Exploração Geofísica: Estudo de caso: bacia Oriente, Equador.** 2007. 92p. Trabalho de Conclusão de Curso (Especialização em Geofísica do Petróleo) – Programa de Pós-graduação em Geologia, Instituto de Geociências, Universidade Federal do Rio de Janeiro, Rio de Janeiro.

Neste trabalho nós mostramos a teoria e aplicação do método magnético na exploração geofísica, com ênfase na prospecção de hidrocarbonetos. Os métodos magnéticos são um dos métodos geofísicos mais antigos e também um dos mais utilizados em prospecção mineral. A bacia sedimentar abordada neste trabalho foi a bacia Oriente localizada no Equador, que faz parte de um conjunto de bacias de foreland que tem uma extensão de 320.000 km². Este sistema é formado pelas bacias Oriente, localizada no Equador, Putumayo, na Colômbia e pela bacia de Marañon, na República do Peru. Estas bacias apresentam características deposicionais muito semelhantes e todas elas apresentam sistemas petrolíferos e são exploradas por várias empresas de exploração geofísica nos dias de hoje, inclusive a Petrobras. Descrevemos em detalhes as características geológicas da bacia Oriente, incluindo aspectos de localização, extensão, estratigrafia, eventos tectônicos e os sistemas petrolíferos da bacia. Em virtude da semelhança entre as bacias Oriente, Putumayo e Marañon, no estudo de caso desta monografia nós discutimos um artigo com medidas magnéticas realizadas na bacia de Putumayo, visto que não foi encontrado nenhum artigo público na literatura com medidas magnéticas realizadas na bacia Oriente. No estudo de caso nós mostramos as características do levantamento utilizado, indicando a área de estudo, o equipamento utilizado no levantamento e os dados obtidos foram analisados e discutidos.

Palavras-chave: Oriente; geofísica; magnetometria.

Abstract

FIRMINO, Josenildo Vicente. **Aplicação do Método Magnético na Exploração Geofísica**: Estudo de caso: bacia Oriente, Equador. [Application of Magnetic Method in geophysical exploration: Case history: Oriente basin, Ecuador]. 2007. 92p. Trabalho de Conclusão de Curso (Especialização em Geofísica do Petróleo) – Programa de Pós-graduação em Geologia, Instituto de Geociências, Universidade Federal do Rio de Janeiro, Rio de Janeiro.

In this work we have shown the theory and applications of the magnetic method in geophysical exploration, with emphasis in hydrocarbons prospecting. The magnetic methods are one of the older geophysical methods and they are one of the most used in mineral exploration. The sedimentary basin boarded in this work was the Oriente basin located in Ecuador, that belong to a set of foreland basins with an extension of 320,000 km², this system is formed by the Oriente basin, located in the Ecuador, Putumayo basin, in the Colombia and Marañon basin, in the Republic of Peru. These basins present depositions characteristics very similar and all of them have petroliferous systems and are exploreds by various companies of geophysical exploration, including the Petrobras. We have described in details the geological characteristics of the Oriente basin, including aspects of localization, extension, stratigraph, tectonic events and petroliferous systems in the basin. In virtue of the similarity between the Oriente, Putumayo and Marañon basins, in the case study of this monograph we have argued about an article with magnetic measurements carried out in the Putumayo basin, since no public paper with magnetic measurements in Oriente basin was found in literature. In the case study we have shown the characteristics of survey used, indicating the study area, the equipments used in survey and the data obtained was analyzed and argued.

Key-Words: Oriente; geophysics; magnetometry.

Lista de figuras, quadros e tabelas

Quadro 1 – Classificação dos materiais magnéticos de acordo com seus valores de susceptibilidade e permeabilidade magnética.....	50
Tabela 1 – Susceptibilidades magnéticas das rochas e minerais ($\times 10^{-6}$ no SI) (MIRANDA).....	57
Figura 1 – Posicionamento geográfico e principais contextos geológicos da Bacia Oriente (BARRAGÁN <i>et al.</i> , 2005).....	8
Figura 2 – Estruturas em meio-gráben do Sistema Capirón-Tiputini (BELOTTI <i>et al.</i> , 2003).....	11
Figura 3 – Geometria das principais zonas de transferência (BELOTTI <i>et al.</i> , 2003).....	12
Figura 4 – Tectônica extensional da parte nordeste da Bacia Oriente. Principais feições estruturais e zonas de transferência (superior) e seções geológicas (inferior) (BELOTTI <i>et al.</i> , 2003).....	13
Figura 5 – Seções sísmicas do Meio-Gráben de Obe. Região sul (superior), central (centro) e norte (inferior) (BELOTTI <i>et al.</i> , 2003).....	14
Figura 6 – Tectônica compressional da parte nordeste da Bacia do Oriente. Principais feições estruturais e dobras anticlinais associadas (BELOTTI <i>et al.</i> , 2003).....	16
Figura 7 – Perfis regionais das principais estruturas no sistema Capirón-Tiputini (BELOTTI <i>et al.</i> , 2003).....	17
Figura 8 – Estrutura de Minta: falha transcorrente dextral (BELOTTI <i>et al.</i> , 2003).....	18
Figura 9 – Complexo Obe-Pimare-Yuturi: falha transcorrente sinistral (BELOTTI <i>et al.</i> , 2003).....	19
Figura 10 – Feições distensionais e compressionais na estrutura ITT (BELOTTI <i>et al.</i> , 2003).....	20
Figura 11 – Seção geológica da Bacia Oriente (BABY <i>et al.</i> , 2004).....	21
Figura 12 – Diagrama estratigráfico da Bacia Oriente (BARRAGÁN <i>et al.</i> , 2005).....	22
Figura 13 – Formações, membros e ciclos sedimentares do Cretáceo da Bacia Oriente, e suas relações com a curva eustática. (WHITE <i>et al.</i> , 2003).....	25
Figura 14 – Seqüências deposicionais da Formação Hollin (WHITE <i>et al.</i> , 1995).....	26
Figura 15 – Estratigrafia da Formação Napo (JAILARD <i>et al.</i> , 1996).....	28
Figura 16 – Estratigrafia do período Paleoceno (BABY <i>et al.</i> , 1999).....	30

Figura 17 – Na Província Putumayo-Oriente-Marañon, a região de maturação termal para óleo (para dentro do polígono de linha de contorno verde) e para gás (para fora da linha) geração de rochas geradoras do Cretáceo, e locações de produção de campos (HIGLEY, 2000).....	35
Figura 18 – Mapa e seção estrutural da Bacia do Oriente com seus três corredores estruturais-petrolíferos BABY <i>et al.</i> (2004).....	39
Figura 19 – Campo magnético total e suas componentes (BLAKELY, 1995 <i>apud</i> PETROBRAS, 2007).....	49
Figura 20 – Curva de Histerese (PETROBRAS, 2007).....	53
Figura 21 – Localização da área de estudo. (CERON <i>et al.</i> , 2002).....	70
Figura 22 – Equipamento utilizado no levantamento. (CERON <i>et al.</i> , 2002).....	71
Figura 23 – Províncias estruturais. (CERON <i>et al.</i> , 2002).....	73
Figura 24 – Resumo estrutural. (CERON <i>et al.</i> , 2002).....	74

Sumário

AGRADECIMENTOS	VI
RESUMO.....	VII
ABSTRACT	VIII
LISTA DE FIGURAS, QUADROS E TABELAS.....	IX
1 INTRODUÇÃO	1
2 OBJETIVO	3
3 METODOLOGIA.....	4
4 CONTEXTO GEOLÓGICO DA BACIA ORIENTE.....	5
4.1 CONTEXTO GERAL	5
4.2 Contexto Geotectônico.....	7
4.2.1 Tectônica da bacia	7
4.3 Geologia Estrutural.....	9
4.3.1 Tectônica Extensional.....	12
4.3.2 Tectônica Compressional	15
4.3.3 Trapas Estruturais	19
4.4 Estratigrafia	21
4.4.1 Paleozóico	22
4.4.2 Jurássico.....	23
4.4.3. Cretáceo	24
4.4.4. Paleoceno-Quaternário.....	29
4.5 Sistemas Petrolíferos	31
4.5.1 Rocha Geradora	31
4.5.2 Migração	33
4.5.3 Reservatório	36
4.5.4 CARACTERIZAÇÃO DOS RESERVATÓRIOS PRINCIPAIS DAS TRÊS UNIDADES TECTÔNICAS	37
4.5.4.1 O "play" ocidental (sistema subandino).....	37
4.5.4.2 O "play" central (corredor sacha-shushufindi).....	38
4.5.4.3 O "PLAY" ORIENTAL (SISTEMA CAPIRÓN-TIPUTINI)	41
4.5.4.3.1 Os campos Ishipingo, Tambococha e Tiputini ("trend" ITT)	41
4.5.5 TRAPAS OU ARMADILHAS.....	42

4.5.5.1	Trapas do "play" ocidental (sistema subandino)	42
4.5.5.2	Trapas do "play" central (corredor Sacha-Shushufindi)	42
4.5.5.3	Trapas do "play" Oriental (sistema Capirón-Tiputini)	43
4.5.6	Rochas Selantes.....	44
5	MÉTODOS MAGNÉTICOS	45
5.1	Introdução	45
5.2	Teoria Elementar e Conceitos Básicos	47
5.2.1	CLASSIFICAÇÃO DOS MATERIAIS MAGNÉTICOS	50
5.2.1.1	Diamagnetismo	51
5.2.1.2	Paramagnetismo	51
5.2.1.3	Ferromagnetismo	51
5.2.1.4	Antiferromagnetismo	52
5.2.1.5	Ferrimagnetismo	52
5.2.2	Curva de Histerese	53
5.3	O Campo Magnético da Terra.....	54
5.3.1	O Campo Principal.....	54
5.3.2	O Campo Externo	54
5.3.3	Anomalias Magnéticas.....	55
5.4	Magnetismo das Rochas e Minerais	56
5.5	Susceptibilidade Magnética das Rochas e Minerais	57
5.6	Instrumentos de Medidas Magnéticas.....	58
5.6.1	Magnetômetro Fluxgate.....	58
5.6.2	Magnetômetro de Precessão de Prótons	59
5.6.3	Magnetômetro de Bombardeamento Óptico.....	60
5.6.4	Gradiômetros	61
5.7	Processamento dos Dados Magnéticos.....	62
5.7.1	Compensação	62
5.7.2	Remoção do IGRF.....	62
5.7.3	Remoção do campo externo (variação diurna).....	63
5.7.4	Nivelamento.....	64
5.8	Filtragem dos dados Magnéticos	65
5.8.1	Separação Regional-Residual	65
5.8.2	Redução ao Pólo	66
5.8.3	Filtros de Derivadas.....	66
5.9	Interpretação dos Dados Magnéticos.....	67
5.10	Estudo de caso	69
5.10.1	Introdução.....	69
5.10.2	Objetivos do Projeto e Metodologia	71
5.10.3	Exemplos	73
5.10.4	Conclusões do Levantamento	75

6 CONCLUSÃO.....76

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS.....77

1 INTRODUÇÃO

Neste trabalho falaremos sobre a teoria dos métodos magnéticos e sua aplicação na prospecção geofísica, com ênfase na exploração de hidrocarbonetos. A bacia utilizada para estudo será a Bacia Oriente, localizada no Equador, que faz parte de um sistema de bacias de foreland que tem uma extensão de 320.000 km² e é formada pelas bacias Oriente-Putumayo-Marañon (a bacia Putumayo localiza-se na Colômbia e a bacia Marañon fica no Peru). Todas essas bacias apresentam sistemas petrolíferos e tem características deposicionais muito semelhantes.

Devido à semelhança entre as bacias acima citadas é esperado que levantamentos magnéticos apresentem resultados semelhantes se efetuados nessas bacias. Na bacia Oriente já foram descobertos vários campos de óleo e muitos desses campos já estão em produção. O mesmo acontece com as bacias de Putumayo e Marañon, onde a prospecção de hidrocarbonetos é realizada atualmente por diversas empresas de exploração geofísica.

A exploração de óleo da Bacia Oriente está em reservatórios cretáceos das formações Hollin e Napo que são as formações mais prolíficas da Bacia Oriente, onde os principais campos estão em dobras suaves desenvolvidas no topo de falhas paleozóicas, com elongação para Norte, por inversão tectônica.

Esta monografia está dividida da seguinte forma: Capítulo um, um capítulo de introdução; Capítulo dois, objetivo do trabalho; No capítulo três será descrito a metodologia empregada na realização deste trabalho; No capítulo quatro será discutida a geologia da Bacia Oriente, incluindo aspectos sobre a localização, estratigrafia, tectônica e os sistemas petrolíferos na bacia; No capítulo cinco, será descrito a teoria dos métodos magnéticos na prospecção geofísica mostrando os tipos de levantamentos utilizados, assim como as etapas

do processamento e da interpretação dos dados medidos e será discutido um estudo de caso com levantamentos magnéticos realizado na bacia de Putumayo; E, por último, no capítulo seis, serão mostradas as conclusões do trabalho.

2 OBJETIVO

O objetivo deste trabalho é mostrar a aplicação dos métodos magnéticos na Bacia Oriente, no Equador, ou, por apresentarem características geológicas semelhantes, em uma das duas outras bacias que formam a província Oriente-Putumayo-Marañon. Neste trabalho serão mostradas as características geológicas dessa bacia e serão comentadas também as aplicabilidades dos métodos de levantamentos magnéticos nessa região.

No estudo de caso serão mostrados dados reais sobre a aplicação dos métodos magnéticos para a exploração de hidrocarbonetos na bacia, mostrando o tipo de levantamento efetuado (o que leva em conta as características da região de estudo), o equipamento utilizado e o resultado do processamento e da interpretação dos dados.

3 METODOLOGIA

Para a realização deste trabalho foram consultados diversos trabalhos publicados sobre geologia e aplicação de métodos de exploração geofísica assim como revistas e sites especializados nesses assuntos. A lista completa das referências utilizadas pode ser encontrada no final desta monografia.

O banco de dados da Petrobras foi de grande importância para a aquisição dos artigos utilizados nesta monografia. Para escrever o capítulo cinco, o capítulo sobre a teoria do método magnético, o texto foi retirado em sua maior parte de um artigo de revisão de métodos magnéticos de Nabighian *et al.*, publicado pela SEG em 2005. O material cedido pelo Dr. John Ceron, da Empresa Colombiana de Petróleos (a Ecopetrol) foi muito útil na escrita do estudo de caso desta monografia.

4 CONTEXTO GEOLÓGICO DA BACIA ORIENTE

4.1 Contexto Geral

A Cadeia Andina representa uma expressão de deformação compressional relacionada a subducção para Leste da Placa de Nazca sob toda a margem Oeste da Placa Sul-Americana. As bacias subandinas encontram-se a Leste da Cordilheira Andina e formam uma série de bacias de retroarco.

Segundo JACQUES (2003) o cenário tectônico Andino pode ser dividido em três principais componentes; Áreas cratônicas estáveis ao Leste, zona de deformação andina à Oeste e um cinturão de bacias de “foreland” intermediária. Individualmente as bacias podem ser divididas em duas regiões; Os Foothills Andinos, um cinturão relativamente estreito de dobras e soergimento a Oeste; e uma região relativamente larga e sem deformação de “foreland” a Leste. As bacias apresentam um perfil assimétrico, com uma espessa seqüência sedimentar nos Foothills Andinos, com afinamento progressivo para Leste na direção do embasamento (geralmente Pré-Cambriano).

Apesar de as bacias andinas serem sempre referidas como clássicas bacias de “foreland”, o tipo de subsidência atual, reconhecido como bacia de “foreland”, geralmente ocorre no final do tempo geológico dessas bacias. O sedimento mais antigo reconhecido é do Cambro-Ordoviciano (Megasseqüência da margem passiva do Gondwana), mas somente no Terciário que a subsidência do retroarco ocorreu no cinturão andino. A moderna Cadeia Subandina desenvolveu-se primariamente do Neoceno ao recente e está relacionada em parte com a quebra da Placa de Farallon a 25 Ma nas atuais placas de Nazca e de Cocos. Isso parece

marcar o começo de taxas de convergência mais ortogonais ao longo da parte central e Sul da margem Oeste da Placa Sul-Americana (PARDO CASAS & MOLNAR, 1987).

A Cadeia Andina é a maior feição morfológica da América do Sul. Ela se estende por mais de 8000 km e pode ser dividida em três grandes segmentos de orientações distintas. O segmento NNE-SSW chamado Andes Norte (12°N - 5°S) tem 2000 km de comprimento e inclui o Norte da Venezuela até o sul do Equador. O Andes Central (5°S - 18°S) tem 2000 km e sua orientação é próxima de NW-SE. Estes dois segmentos são separados pela inflexão Huancabamba. O terceiro segmento, Andes Sul, tem aproximadamente 4000 km e direção N-S. Na sua parte mais austral muda sua direção para E-W. O segmento chileno é separado do peruano pela inflexão Arica.

A evolução tectônica de cada segmento deste tem particularidades e diacronismo de eventos que tornaria muito complexa sua descrição, por este motivo neste trabalho, foi estudada a evolução tectônica do segmento mais ao norte chamado Colômbia-Equador.

Este segmento pode ser ainda dividido em três segmentos baseados em suas características geológicas e estruturais: os Andes Venezuelanos (Andes Mérida), os Andes Colombianos e os Andes Equatorianos. Pela localização da bacia estudada, iremos neste trabalho fixar preferencialmente nossas descrições na área que compreende os Andes Equatorianos.

Os Andes Equatorianos podem ser divididos morfológicamente em quatro segmentos. A área costeira com largura entre 50 a 180 km e altura máxima de 300 m, formado por rochas alóctones de idade cretácea, sob rochas continentais terciárias e sedimentos paleógenos clásticos e carbonáticos. Esta seqüência finalmente é coberta por extensos depósitos aluvionais recentes trazidos por rios que descem da região andina.

A Cadeia Andina é formada pela Cordilheira Oeste e pela Cordilheira Real. Entre elas, há um gráben inter andino, com aproximadamente 50 km de largura formado durante eventos transtensionais miocênicos.

A Bacia Oriente situa-se na parte Noroeste (NW) da Placa Sul-Americana abrangendo geograficamente o Equador, em continuidade, para o Sul, com a Bacia Marañon (Peru) e, para o Norte, com a de Putumayo na Colômbia. Separa-se, ainda, da Bacia Amazonas, a Leste.

Geologicamente, a área em questão é descrita por uma zona de contato entre as atuais Placas Litosféricas de Nazca e Sul-Americana, relacionada a processos de subducção e convergência oblíqua.

É uma ampla unidade geológica, desenvolvida principalmente durante o Cretáceo, e está incluída na província Putumayo-Oriente-Marañon, um sistema de bacias *foreland*, que cobre aproximadamente 320.000 km² (MATHALONE & MONTOYA, 1995).

Estratigraficamente e estruturalmente, a bacia Oriente preserva uma historia geológica complexa desde o Fanerozóico começando com a deposição do Paleozóico Inferior e culminando com os depósitos Terciários vindos da dobra de empurrão dos cinturões Andinos (WHITE *et al.*, 1995).

4.2 Contexto Geotectônico

4.2.1 Tectônica da bacia

A Bacia Oriente (DASHWOOD & ABBOTS, 1990) forma parte do grande sistema de bacias de *foreland* de Marañon-Oriente-Putumayo, desenvolvida entre os embasamentos pré-cambrianos Brasileiro-Guiano ao Leste, e à Cordilheira Andina ao Oeste (Figura 1).

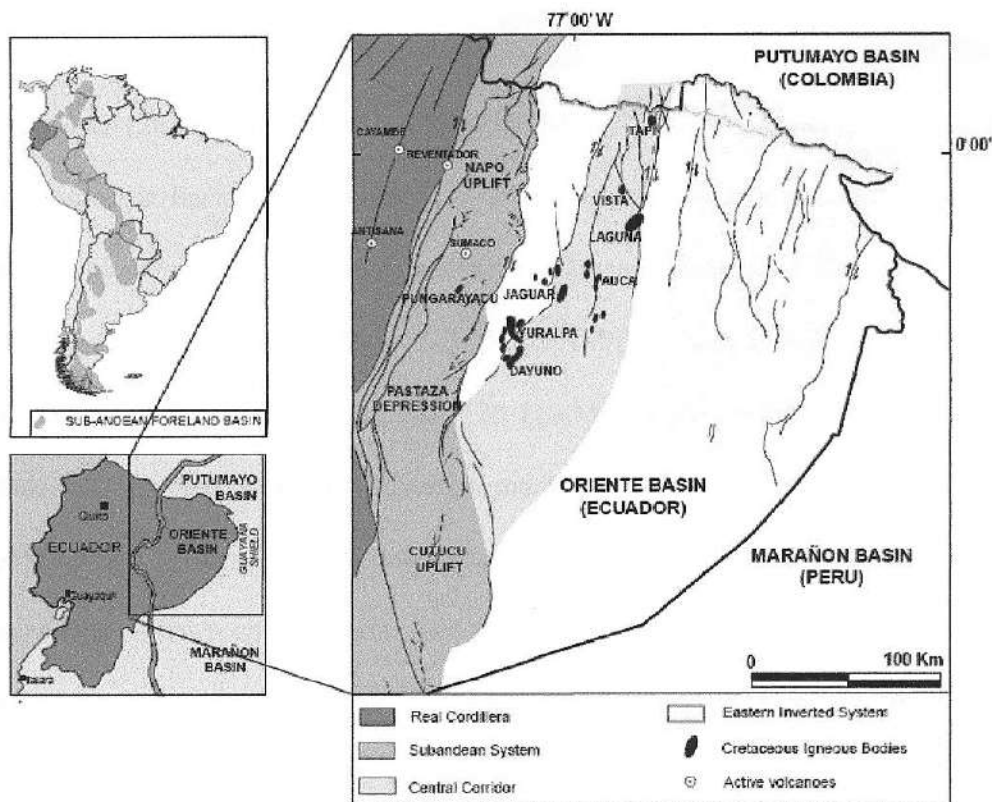


Figura 1 – Posicionamento geográfico e principais contextos geológicos da Bacia Oriente. (BARRAGÁN *et al.*, 2005).

Ela preserva um preenchimento sedimentar variando na idade do Paleozóico ao Quaternário, sobre um embasamento cratônico pré-cambriano. A coluna estratigráfica da bacia pode ser dividida em uma série Pré-Cretáceo, que é discordantemente sobreposta a um ciclo sedimentar continental a marinho raso (WHITE *et al.*, 1995) e por uma cobertura de sedimentos cenozóicos (CHRISTOPHOUL *et al.*, 2002).

A série Pré-Cretáceo compreende sedimentos marinhos paleozóicos, depósitos de rifts continentais a marinhos do Triássico e Jurássico Inferior, e os sedimentos vulcanoclásticos do back-arc do Jurássico Superior (DASHWOOD & ABBOTS, 1990). O ajuste tectônico foi dominado pelo rifteamento do Triássico Superior-Jurássico Inferior, induzido pelo alinhamento E-W do sistema Tethis (JAILARD *et al.*, 2000), seguido por um regime extensional de retroarco do Jurássico Superior iniciado pelo início da subducção Andina e

pela atividade associada do arco vulcânico continental de Misahualli-Colan (ASPDEN *et al.*, 1987). Em 140-120 Ma (ASPDEN & LITHERLAND, 1992), uma mudança importante no ajuste geológico da Bacia Oriente ocorreu, com o encerramento da subducção e atividade do arco magmático, interpretados como o resultado da acreção de terrenos alóctones na margem Equatoriana e Colombiana [(JAILARD *et al.*, 2000, ASPDEN & LITHERLAND, 1992)].

Após um hiato sedimentar principal (120-110 Ma), a série sedimentar do Cretáceo foi depositada. Compreende depósitos fluviais a marinho raso do Aptiano ao Campaniano das formações Hollin e de Napo. A megasseqüência de Hollin-Napo é caracterizada por seqüências cíclicas das rochas calcárias, dos xistos e de arenitos. Sua deposição e distribuição em uma plataforma estável ao longo de um depocentro de NW-SE foram controlados por flutuações eustáticas globais do nível do mar durante o Cretáceo (WHITE *et al.*, 1995).

Finalmente, a série sedimentar Cretáceo Superior-Cenozóico foi depositada após um importante hiato sedimentar na base dos arenitos do Mastrociano-Paleoceno Inferior e da Formação Tena, um evento erosivo que pudesse refletir a acreção dos alóctones Pallatanga, Macuchi e do bloco litoral de Pinon (ASPDEN & LITHERLAND, 1992). Esta cobertura, Cretáceo Superior-Cenozóico, representa a seção dentrítica associada com o desenvolvimento do verdadeiro sistema Andino de retroarco (CHRISTOPHOUL *et al.*, 2002).

4.3 Geologia Estrutural

De acordo com BABY *et al.*, (2004), a Bacia Oriente é subdividida em províncias estruturais caracterizadas por diferentes aspectos geométricos e cinemáticos, ligados a uma herança pré-cretácea. Tais províncias estruturais da bacia equatoriana são denominadas Cordilheira Real, Sistema Subandino (Play ocidental), Corredor Sacha-Sushunfindi (Play central) e Sistema Capirón-Tiputini (Play oriental)

A Cordilheira Real é descrita por grandes estruturas relacionadas ao paroxismo dos Andes durante o Mio-Plioceno.

O Sistema Subandino é o complexo aflorante da Bacia Oriente, onde esforços transpressivos causaram movimentação dextral e falhas normais N-S a NNE-NNW, as quais foram invertidas posteriormente (BABY *et al.*, 2004). Esse complexo apresenta ao Norte o Alto Napo, um imenso domo alargado orientado a NNE-SSW, limitado a Leste e a Oeste por falhas transpressivas; ao centro, a Depressão Pastaza, com falhas inversas do embasamento que geraram anticlinais com vergência Leste, sendo ocupada pelo cone aluvial de Pastaza; e ao Sul, a Cordilheira de Cutucú, que apresenta uma mudança na orientação das estruturas para N-S a NNW-SSE, a aparição de formações triássicas e jurássicas, e em menor proporção paleozóicas.

O Corredor Sacha-Sushunfíndi apresenta uma deformação dada por grandes falhas transpressionais, em geral de direção NNE-SSW. Estas falhas se verticalizam em profundidade, e por vezes desenvolvem estruturas em flor na superfície (BABY *et al.*, 2004).

O Sistema Capirón-Tiputini, por exibir um caráter extensivo mais expressivo, é descrito por estruturas acomodadas sobre uma rampa de *Foredeep*, sob a qual ocorrem grábens dobrados e invertidos (CAVALCANTI, 1995). Há três importantes estruturas em meio-gráben na região NE da bacia: Ishpingo-Tiputini-Tambococha (ITT), com orientação NNE e mergulho a Leste; Obe, de direção NNW e mergulho a Leste; e Capirón e Pañacocha, com orientação N e mergulho a Oeste (ver Figura 2).

A evolução dos falhamentos formadores destes grábens criou zonas de transferências, sendo que há três geometrias principais descritas (BELOTTI *et al.*, 2003), ver Figura 3.

- *Zona de transferência convergente conjugada de Tivacuno*

Representa uma mudança ao longo do strike nas polaridades do meio-gráben e no offset dos depocentros (o meio-gráben de Obe, de mergulho Leste e vergência Oeste, com o meio-

gráben de Capirón, que mergulha a Oeste e tem vergência Leste), resultando em uma feição estrutural relativamente positiva.

- *Zona de transferência conjugada divergente de Yuturi*

Esta zona conecta o meio-gráben de Obe (mergulho a Leste e vergência a Oeste) com o meio-gráben de Pañacocha (mergulho a Oeste e vergência Leste).

- *Zona de transferência sintética conjugada do ITT*

Nesta região, a principal falha do meio-gráben é segmentada ocasionalmente, com a geração de transferência. A transferência do deslocamento entre segmentos individuais é realizada por rampas de *relay*.

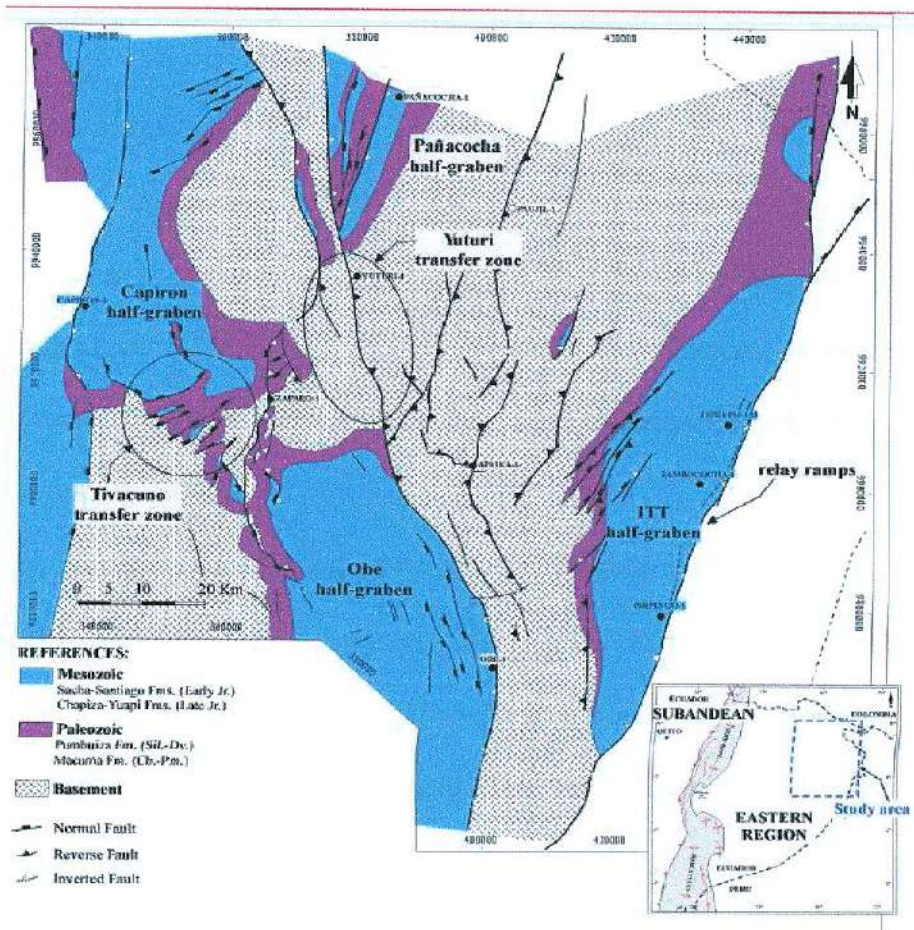


Figura 2 – Estruturas em meio-gráben do Sistema Capirón-Tiputini (BELOTTI et al., 2003).

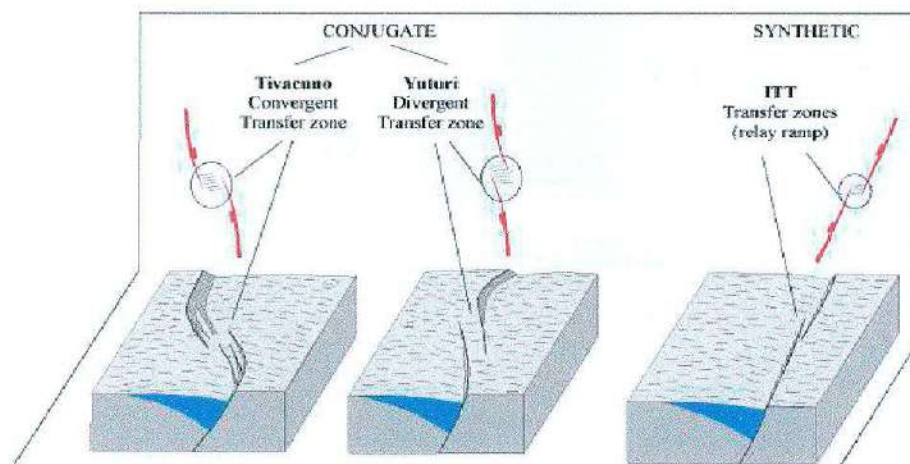


Figura 3 – Geometria das principais zonas de transferência (BELOTTI *et al.*, 2003).

4.3.1 Tectônica Extensional

Dados sísmicos indicam uma história estrutural complexa, em que ocorreram regimes distensional e compressional (BELOTTI *et al.*, 2003), concluiu um episódio distensional Pré-Cretáceo, com a componente σ_3 atuando na direção Oeste-Noroeste (Figura 4). Perfis geológicos identificados como I, II, III e IV nessa Figura, ilustram grandes riftes controlados por geometrias de falhas, as quais foram fortemente influenciadas pela fábrica Pré-Cambriana e Paleozóica pré-existentes.

Analisando seções sísmicas referentes ao meio-gráben de Obe (linhas 1, 2 e 3 na Figura 4), observa-se ao Sul (Figura 5, superior), mergulhos da fábrica do embasamento subparalelos à falha principal distensional de mergulho Oeste, enquanto que ao Norte (Figura 5, centro e inferior), nota-se mergulhos da fábrica do embasamento a Leste, gerando elevado ângulo entre este plano e a falha principal, a qual teve sua propagação inibida, resultando no abortamento deste meio-gráben.

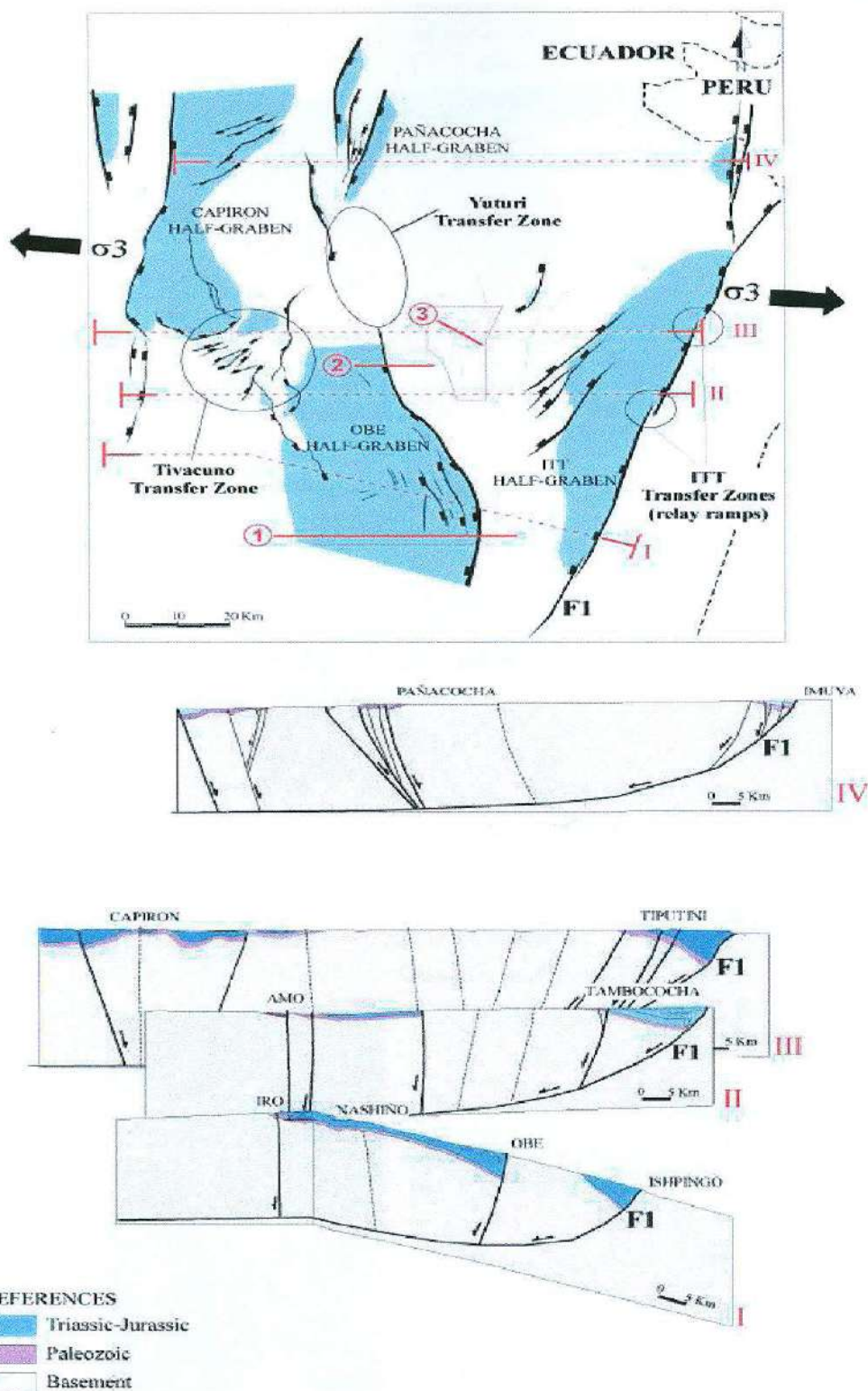


Figura 4 - Tectônica extensional da parte nordeste da Bacia Oriente. Principais feições estruturais e zonas de transferência (superior) e seções geológicas (inferior) (BELOTTI et al., 2003).

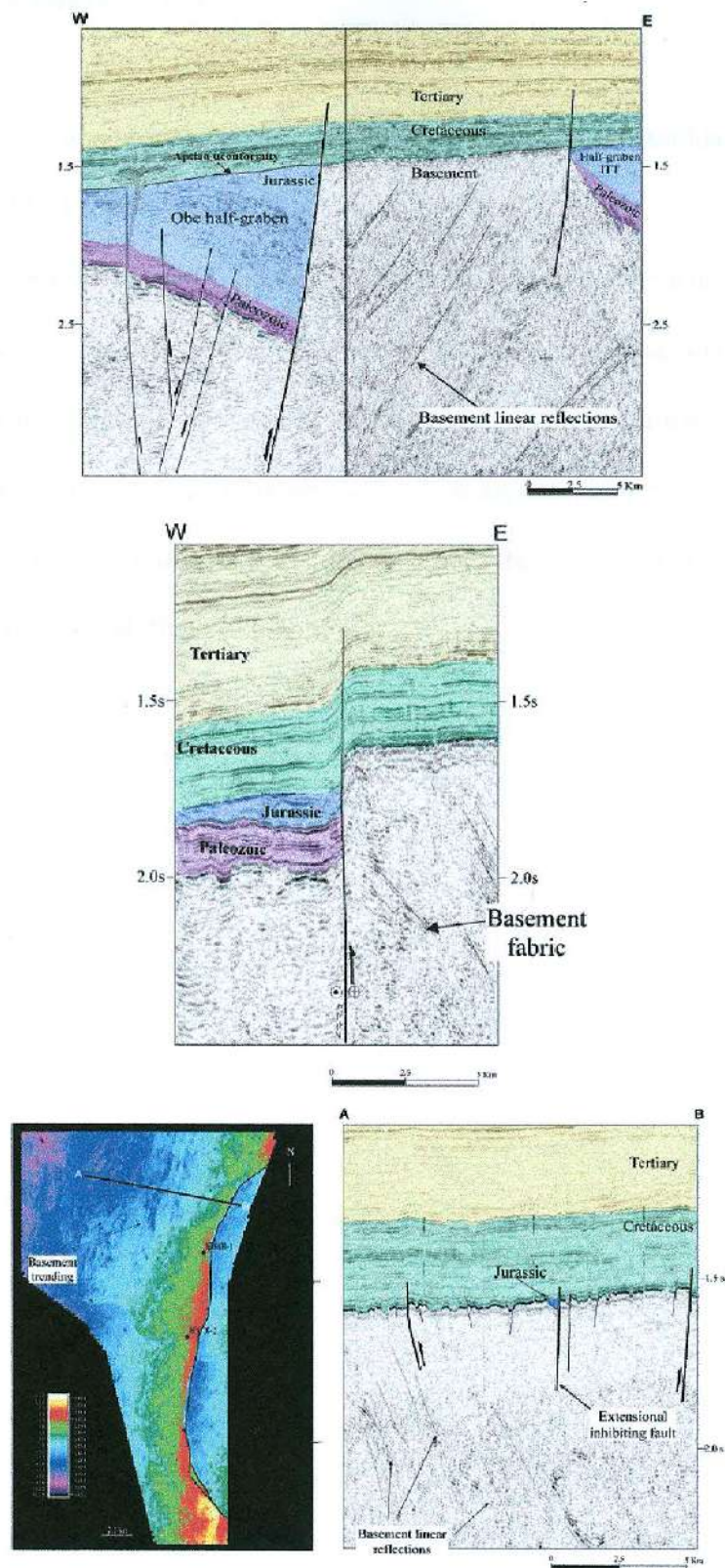


Figura 5 – Seções sísmicas do Meio-Gráben de Obe. Região sul (superior), central (centro) e norte (inferior) (BELOTTI *et al.*, 2003).

4.3.2 Tectônica Compressional

No final do Aptiano, a subsidência controlada por falhas foi substituída pela subsidência térmica regional (BELOTTI *et al.*, 2003).

No limite Cretáceo-Terciário, houve uma segunda fase da convergência transpressional na Cordilheira Real, simultânea com a obdução de crosta oceânica, iniciando, na Bacia Oriente, o desenvolvimento de uma rede de falhas reversas do embasamento. A convergência foi acelerada no fim do Cenozóico sul-americano, e continua acentuando o relevo em algumas das falhas reversas do embasamento e nas dobras associadas, como observado na Figura 6 e nos modelos geológicos I, II, III e IV, Figura 7.

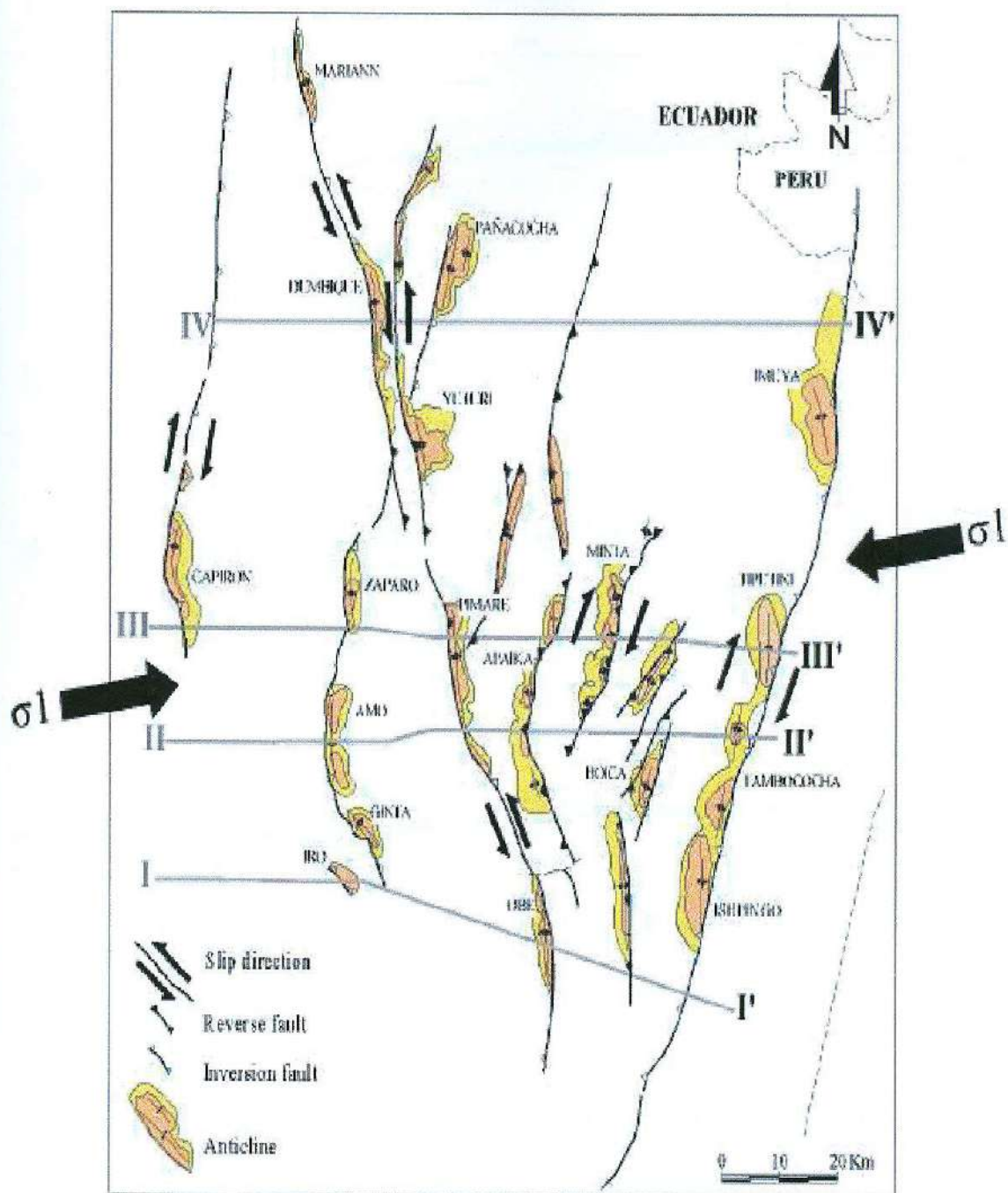


Figura 6 – Tectônica compressional da parte nordeste da Bacia do Oriente. Principais feições estruturais e dobras anticlinais associadas (BELOTTI *et al.*, 2003).

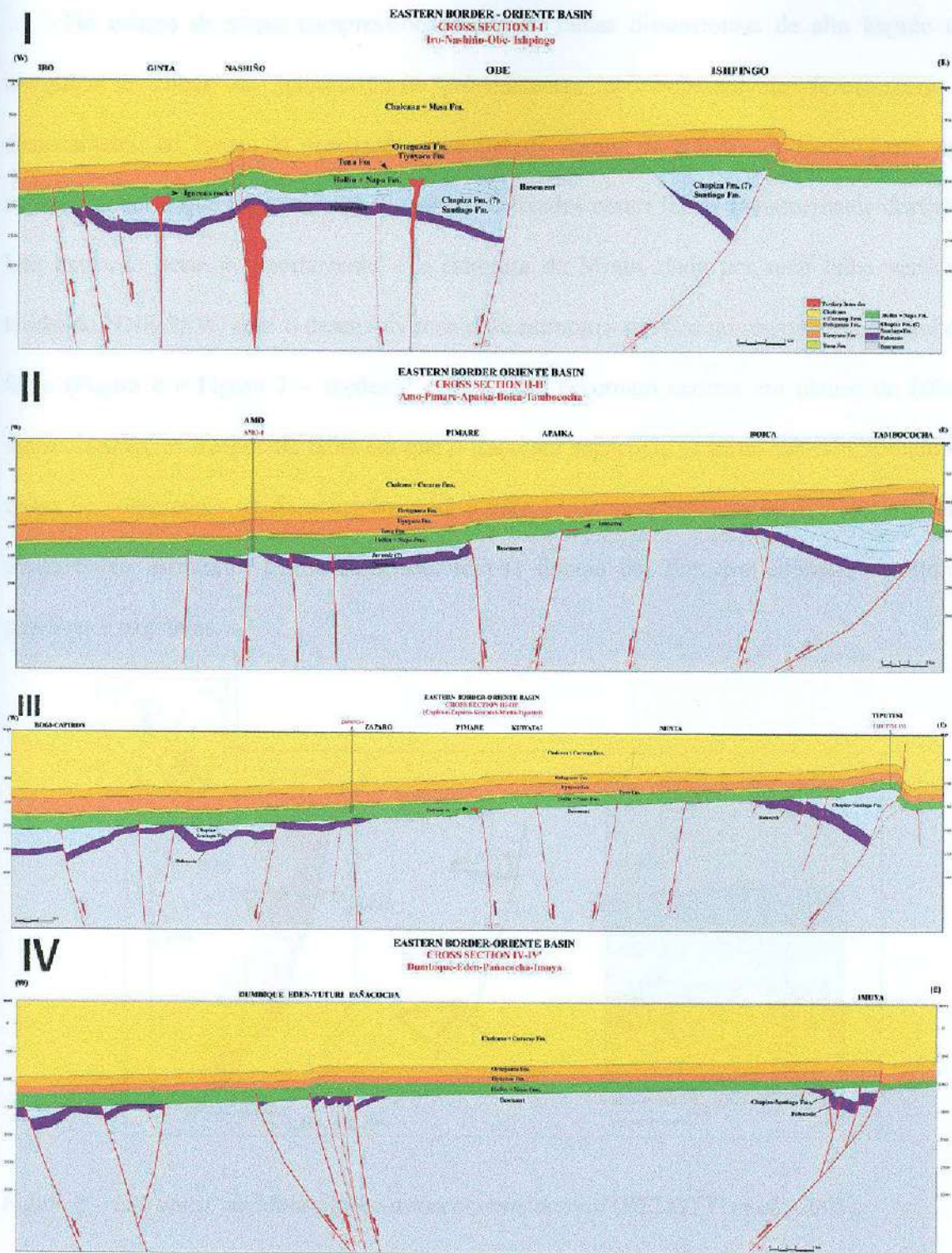


Figura 7 – Perfis regionais das principais estruturas no sistema Capirón-Tiputini (BELOTTI et al., 2003).

No campo de stress compressional (σ_1), as falhas distensionais de alto ângulo de mergulho e zonas de transcorrência pré-existentes no embasamento favoreceram o deslocamento ao longo da orientação principal da região de colisão. A maior parte, em especial aquelas que tendem NE-SW, foram reativadas como falhas transcorrentes dextrais. Um exemplo deste comportamento é a estrutura de Minta, dada por uma falha vertical, tendendo NNE-SSW, com o desenvolvimento de estruturas em flor no segmento principal da falha (Figura 8 e Figura 7 – seções 2 e 3). Como é comum ocorrer em planos de falhas transcorrentes, os trechos da falha em que o traço em superfície se torna curvado, tornam-se zonas de compressão ou de extensão, e há a geração de uma elevação estrutural ou de um ponto baixo estrutural. Como resultado, têm-se dobras em flor que alternam estruturas positivas e negativas.

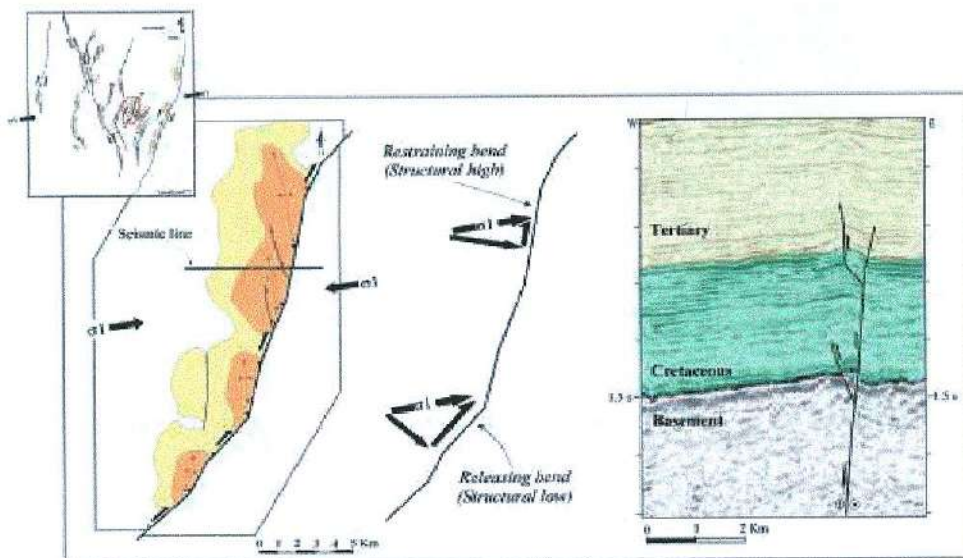


Figura 8 – Estrutura de Minta: falha transcorrente dextral (BELOTTI *et al.*, 2003).

Falhas transcorrentes de caráter sinistral são menos comuns na Bacia Oriente, ao menos na parte Norte, devido à orientação NE-SW de muitas das estruturas. Como exemplo sinistral, tem-se o complexo Obe-Pimare-Yuturi, formado por uma falha NW-SE de alto ângulo (Figura 9). Nesta área, o deslocamento no *hangingwall* desta falha gera o anticlinal da falha de Obe ao

Sul (Figura 9 e Figura 7 – seções 1 e 4), e no *footwall*, gera os anticlinais de falha de Pimare e de Yuturi para o Norte (Figura 9 e Figura 7 – seções 3 e 4).

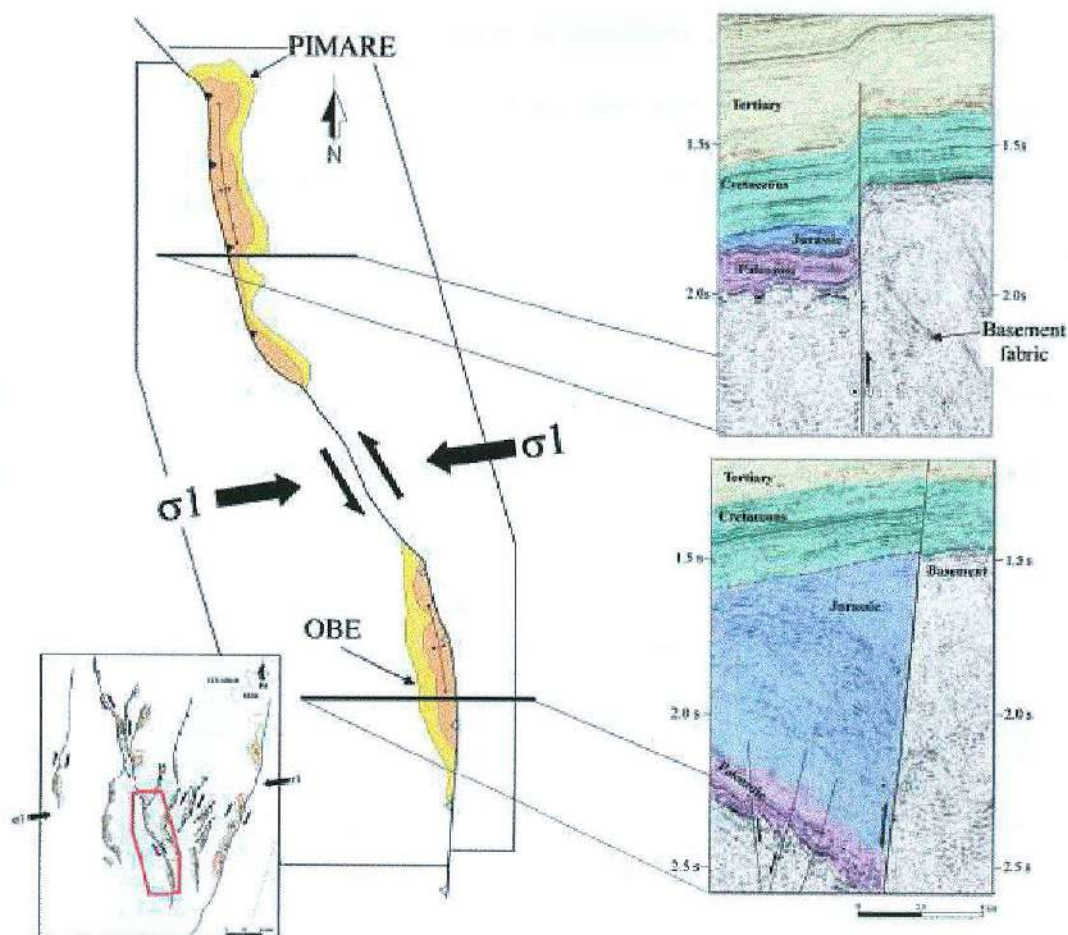


Figura 9 – Complexo Obe-Pimare-Yuturi: falha transcorrente sinistral (BELOTTI *et al.*, 2003).

4.3.3 Trapas Estruturais

As três zonas estruturais da Bacia Oriente – Zona Subandina, Corredor Sasha-Shushufindi e Sistema Capirón-Tiputini, atuam gerando três estilos de estruturas de trapeamento (MATHALONE & MONTOYA, 1995): zona de trapas geradas por

cavalgamentos, envolvendo rochas do embasamento; dobramentos e trapas compressionais, algumas com efeito de sal; e traçamentos por inversão tectônica.

A exploração de óleo da Bacia Oriente está em reservatórios cretáceos – arenitos, principalmente de Hollin e de Napo; onde os principais campos estão em dobras suaves desenvolvidas no topo de falhas paleozóicas, com elongação para Norte, por inversão tectônica (MATHALONE & MONTOYA, 1995; CANFIELD *et al.*, 1982).

A inversão tectônica das falhas foi favorecida onde o campo de esforço compressional foi reativado em planos de falhas listricas pré-existentes de mergulho moderado, de 45 a 55° (BELOTTI *et al.*, 2003). Um exemplo é a estrutura de Ishpingo, Tiputini e Tambococha (ITT), onde as trapas estruturais são anticlinais falhadas associadas com a inversão tectônica (Figura 10).

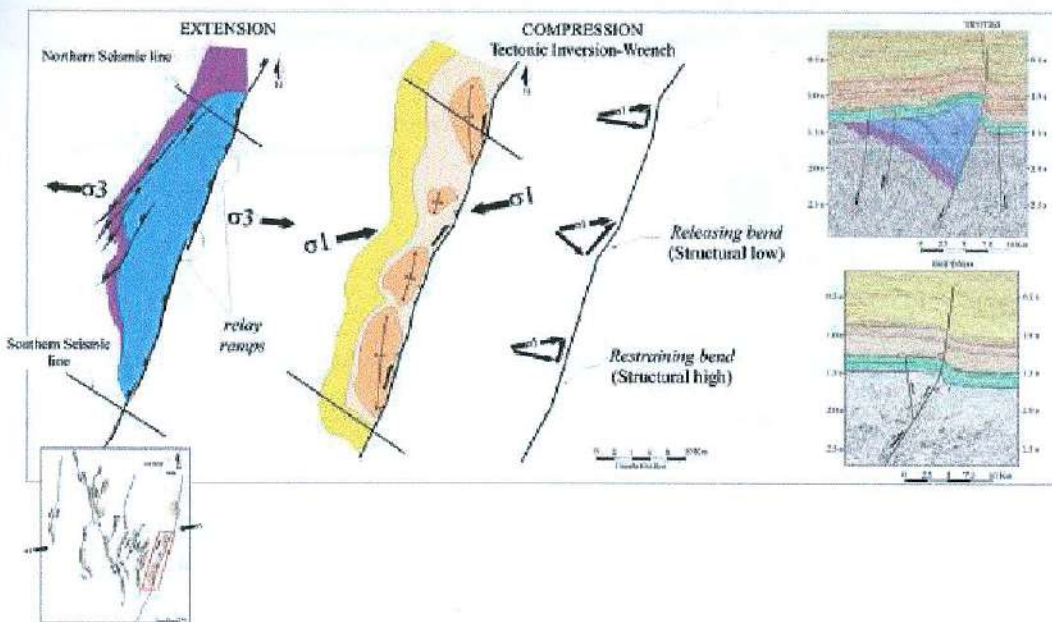


Figura 10 – Feições distensionais e compressionais na estrutura ITT (BELOTTI *et al.*, 2003).

4.4 Estratigrafia

A Bacia Oriente possui rochas sedimentares cujas idades variam do Paleozóico ao Quaternário, que se sobrepõe a um embasamento metamórfico e ígneo do período Pré-Cambriano (WHITE *et al.*, 1995). A Figura 11 e a Figura 12 ilustram, respectivamente, a seção geológica e a carta estratigráfica geral desta bacia equatoriana.

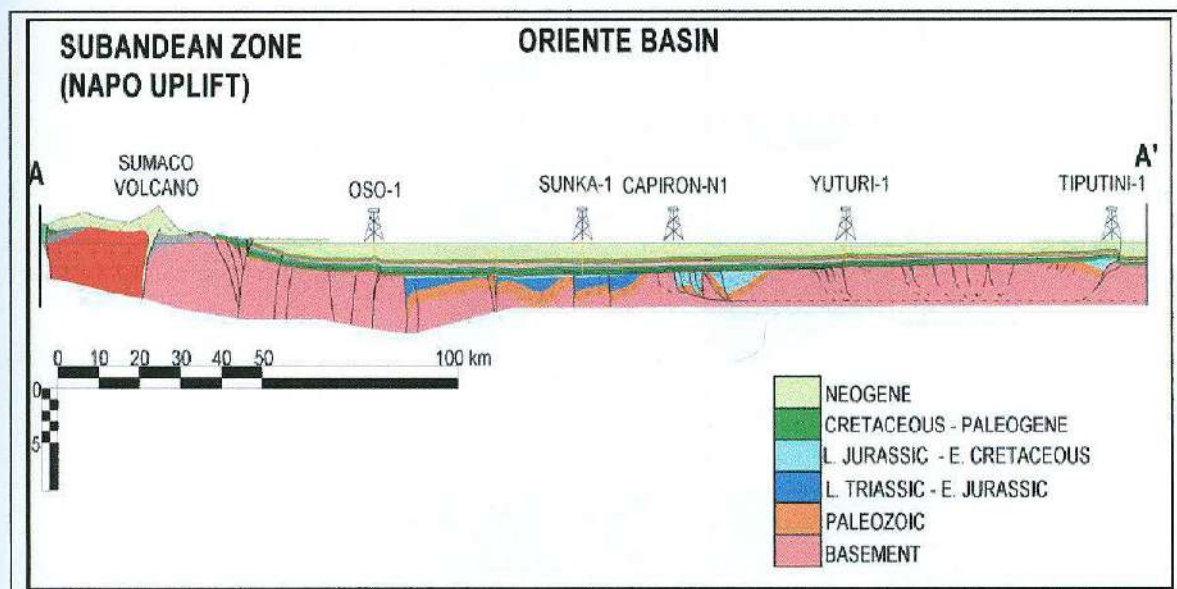


Figura 11 – Seção geológica da Bacia Oriente (BABY *et al.*, 2004).

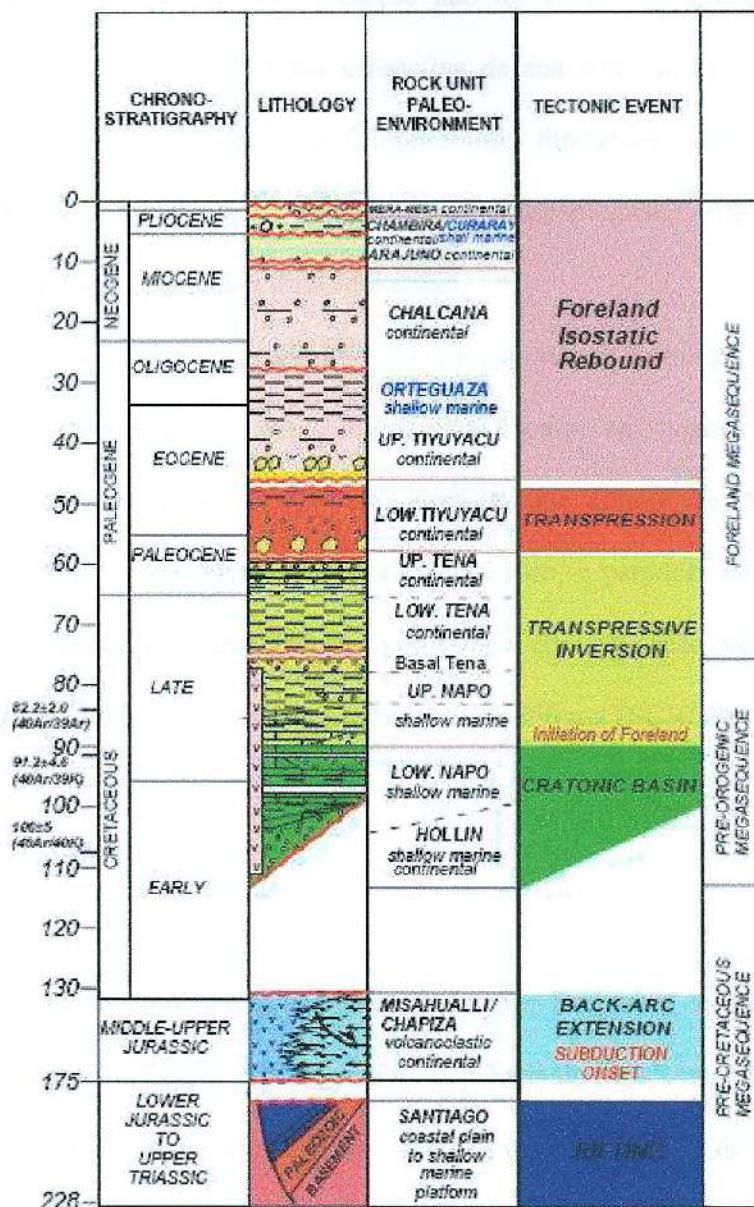


Figura 12 – Diagrama estratigráfico da Bacia Oriente (BARRAGÁN et al., 2005).

4.4.1 Paleozóico

As rochas do período Paleozóico são divididas em dois grupos: Formação Pumbuiza e Formação Macuma. Grande parte da formação Pumbuiza é constituída por finas camadas de ardósias, de cor cinza escuro a preto, em locais grafiticos, e arenitos quartzíticos de

granulometria fina. Como a base da formação não foi vista e as ardósias são altamente deformadas e falhadas não há nenhuma estimativa da sua espessura (TCHOPP, 1953). O contato com a formação Macuma não foi observado diretamente. As fortes dobras da formação Pumbuiza junto com interpretações fotogeológicas apontam para uma inconformidade angular separando a duas formações.

A formação Macuma Inferior consiste, em sua maioria, de finas camadas siliciclásticas de calcário muito fossilífero, de cor cinza a azul escuro, em lugares pseudo-oolíticos, alternando com folhelhos pretos e ardósias, enquanto que a formação Macuma Superior consiste de uma espessa seqüência, branco a cinza escuro, e paredões de calcário maciços intercalados com folhelhos. Mesmo não sendo observada em uma seção contínua, a espessura da Macuma Superior pode ser estimada em no máximo 1250 m (TSCHOPP, 1953).

4.4.2 Jurássico

Do período Jurássico temos as seguintes formações: Formação Santiago e a Formação Chapiza. A Formação Santiago compreende uma seqüência de finas camadas de calcário mais ou menos siliciclásticos, cinza escuro a preto com uma quantidade igual de arenitos calcíticos cinza com intercalações em algumas partes de folhelhos pretos betuminosos (TSCHOPP, 1953). De acordo com esse autor, o limite inferior da formação ainda não foi observado. O conteúdo de fósseis da formação é muito pobre, além de poucos pelecípodes não identificados, restos de peixes e radiolários mal preservados, amonitas esmagados e espalhados desde o limite superior até as partes mais profundas da formação (TSCHOPP, 1953).

Evaporitos na formação Chapiza Inferior revela a proximidade do mar Jurássico; estratificação cruzada nos arenitos, *ripple marks*, *mudcracks* nos folhelhos e a completa

ausência de vida marinha e a escassez da flora aponta para uma deposição continental e um clima árido temporário seguido da fase Misahualli, com intensa atividade vulcânica (TCHOPP, 1953).

4.4.3. Cretáceo

A estratigrafia do período Cretáceo da Bacia Oriente é dividida em três formações: Hollin, Napo e Tena basal e são as mais produtoras deste ambiente sedimentar. Estas formações caracterizam-se por um ciclo seqüencial de rochas calcárias, xistos e arenitos cuja deposição e distribuição foram controladas pelas mudanças relativas do nível do mar (WHITE *et al.*, 1995). A Figura 13 descreve a seqüência deposicional do período Cretáceo da Bacia Oriente, onde à direita da curva eustática de HAQ *et al.* (1987) se observa os diferentes membros da megasseqüência Hollin-Napo-Tena Basal, enfatizando os intervalos clásticos correspondentes aos arenitos Hollin Principal, T, U, M2, M1 e Tena Basal (BARRAGÁN *et al.*, 2004).

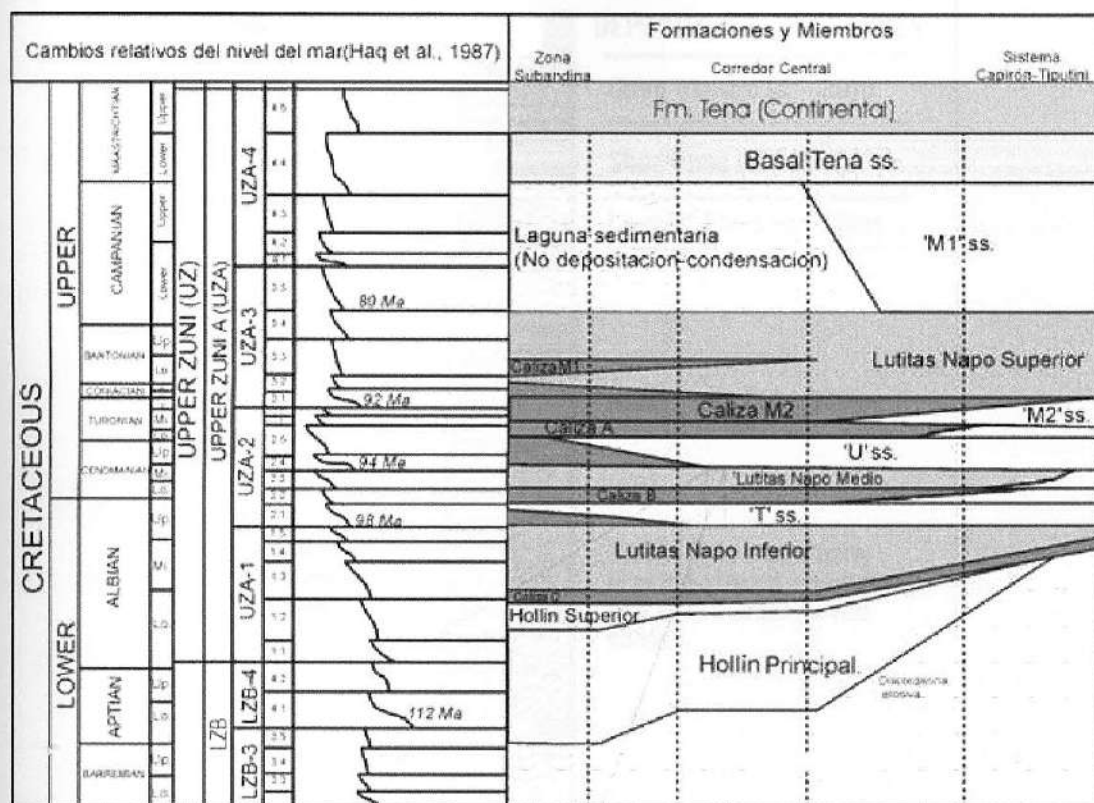


Figura 13 – Formações, membros e ciclos sedimentares do Cretáceo da Bacia Oriente, e suas relações com a curva eustática. (WHITE *et al.*, 2003)

No lado ocidental da Bacia Oriente, a formação Hollin consiste de cinco seqüências deposicionais sucessivas: três seqüências nos arenitos do Hollin Principal e duas na formação do Hollin Superior (WHITE *et al.*, 1995), ver Figura 14.

A formação Hollin é de idade Albiano, embora os estratos basais do Hollin Principal possam datar do Aptiano superior. A fauna e a flora fósseis, embora escassos, sugerem que a Formação Hollin é diacônico e segue a ascensão total do nível do mar durante a deposição das formações do Hollin Superior e do Napo Inferior (WHITE *et al.*, 1995).

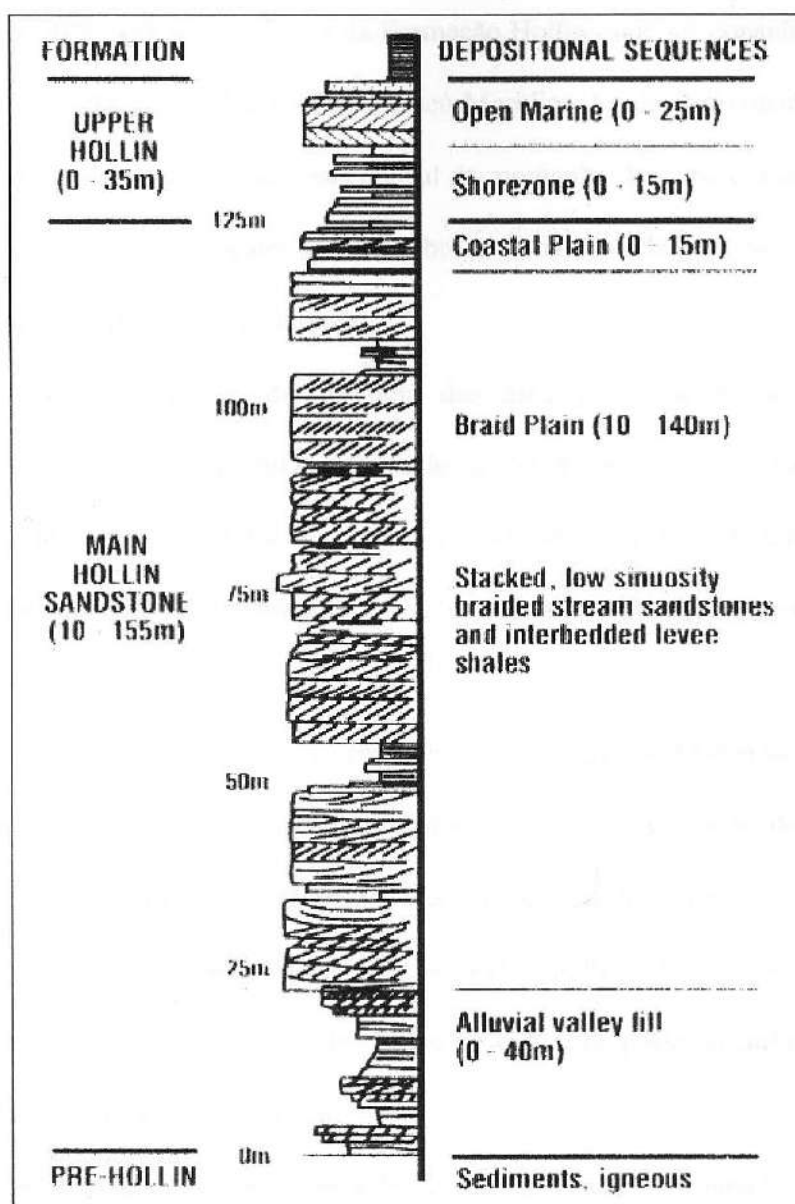


Figura 14 – Sequências deposicionais da Formação Hollin (WHITE *et al.*, 1995).

O arenito da formação é geralmente de granulometria grossa, cor branca, poroso, camada compactada a maciça, comumente apresentam estratificação cruzada e raros ripples. Camadas planas são marcadas por finas intercalações de folhelho, em muitas partes folhelhos micáceos e também folhelhos carbonosos escuros na parte superior da seção (TSCHOPP, 1953).

Para TSCHOPP (1953) a espessura da Formação Hollin pode ser considerada com uma exposição média de 200 m nas Montanhas Cutucú Meridional e de aproximadamente 150 m no alto de Napo. Ao longo do flanco leste do Sul da montanha de Cutucu a formação Hollin repousa sem inconformidade angular visível sobre a formação Chapiza, no flanco oeste de Cutucu ocidental ela repousa sobre Santiago.

A Formação Napo é considerada uma das mais prolíficas rochas geradoras de hidrocarbonetos na América do Sul, consistindo de folhelhos ricos em matéria orgânica, grainstones bioclásticos e packstones, e arenitos terrígenos que se acredita terem sido depositados num ambiente fluvial, marinho e deltáico durante o Cretáceo Superior (WHITE *et al.*, 1995).

A Formação Napo persiste da Cordilheira Real a Leste estendendo-se por todo o Oriente, provado por poços e indicado por dados de sísmica. Ao longo do escarpamento Andino a Formação Napo é considerada afetada pelo tectonismo e descontínuo nos afloramentos com falhamentos preferenciais (TSCHOPP, 1953). Ela sobrepõe-se conformemente sobre a Formação Hollin Superior e é sobreposta inconformemente pela Formação de Tena (WHITE *et al.*, 1995).

Baseado na litologia e no persistente horizonte calcário nas Montanhas Cutucú e nos dados de poços a Formação Napo foi dividida por TSCHOPP (1953), da seguinte forma: (i) Napo Inferior, folhelhos arenosos de coloração verde-acinzentado, cinza escuro, preto ou cinza com nódulos de arenito glauconítico, lentes, camadas, e poucos calcários subordinados; (ii) Napo Médio, composto principalmente por calcário, com uma zona de calcários acamadados a maciços, mantendo uma espessura constante nos poços, e (iii) Napo Superior, folhelhos verdes acinzentados, cinza escuro e preto. Todas as três subdivisões foram claramente identificadas nos perfis elétricos.

A Figura 15 ilustra as litologias e as relações estratigráficas da Formação Napo na parte ocidental da Bacia Oriente. Os arenitos T, U, e M de Napo são relacionadas a uma série dos ciclos transgressivo-regressivo que construíram a estratigrafia da formação (WHITE *et al.*, 1995).

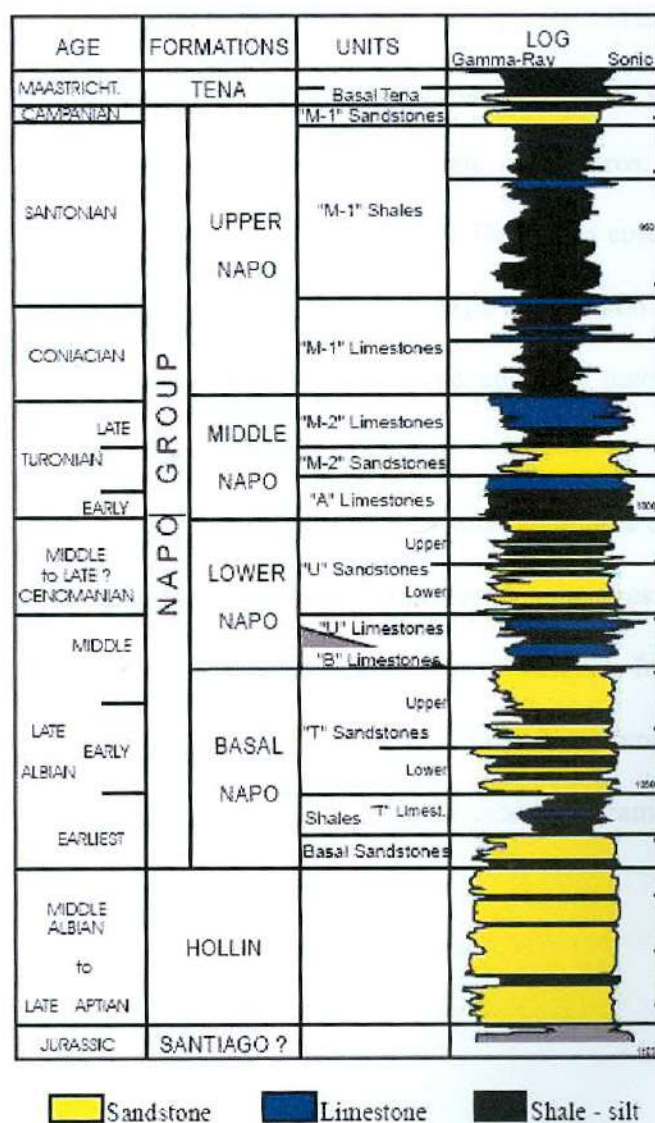


Figura 15 – Estratigrafia da Formação Napo (JAILARD *et al.*, 1996).

As rochas da Formação Napo foram divididas em nove fácies baseadas em espécime e em observações finas da seção. Duas destas fácies são rochas calcárias depositadas quando a

fonte clástica era muito baixa. O packstone foraminífero ao grainstone consistem do foraminífero pelágico, fragmentos raros de peixes, e seixos fosfatos em uma matriz laminada cristalina de carbonatos. Estas fácies foram depositadas abaixo de uma superfície altamente produtiva do mar em um assoalho de mar anaeróbico, de muito baixa energia. Os laminitos não-calcários finamente laminados contém fragmentos de peixes e camadas bivalves depositados em um ambiente marinho anóxico de baixa energia (HUNTER *et al.*, 2000).

Os folhelhos da Formação Napo Superior são duros, laminados, cinza escuro a preto, apresentam-se intercalados com calcários parcialmente fossilíferos, em camadas com espessura fina a média, cinza escuro. (TSCHOPP, 1953). Os fósseis coletados por WASSON & SINCLAIR (1927, pp. 1268-72 *apud* TSCHOPP, 1953) e identificado por Reeside, localiza a Formação Napo no Albiano-Turoniano. Coleções de amonitas determinam um período contínuo do Albiano ao Coniaciano (TSCHOPP, 1953).

As Formações Tena Basal e Tiyuyacu são os estratos anteriores do preenchimento do Pós-Napo e consistem de folhelhos, arenitos e conglomerados menores. O intervalo Hollin-Napo consiste de cerca de 500 m de arenitos continentais e marinhos, folhelhos e carbonatos (WHITE *et al.*, 1995). Os reservatórios de arenitos de Hollin e Napo provaram ser produtores consistentes desde que sua a produção inicial foi estabelecida primeiramente em agosto 1972 (WHITE *et al.*, 1995).

4.4.4. Paleoceno-Quaternário

O período Paleoceno-Quaternário abrange as seguintes formações: Tena, Tiyuyacu, Ortequaza, Arajuno, Chambira, Curaray e Mera. As formações sedimentares Tiyuyacu, Ortequaza e Chalcana foram depositadas durante o Eoceno-Oligoceno na Bacia Oriente (Figura 16).

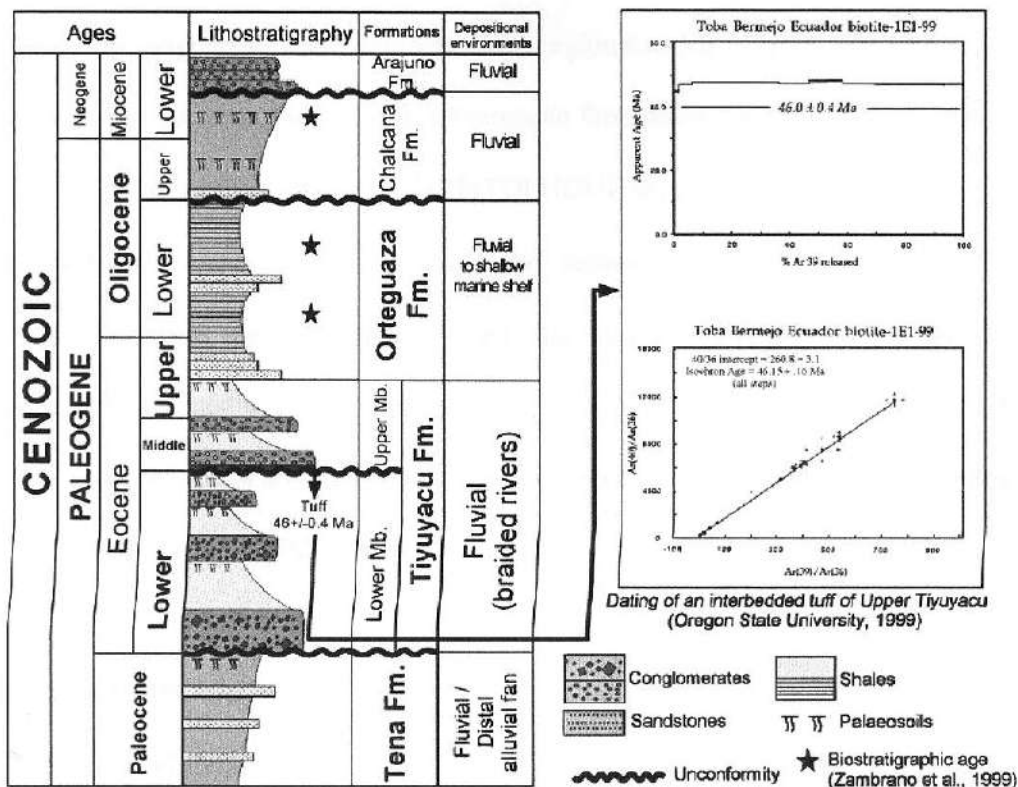


Figura 16 – Estratigrafia do período Paleoceno (BABY *et al.*, 1999).

A Formação Tena consiste principalmente de argila vermelho-amarronzada com uma quantidade variada de arenitos na parte mais inferior e superior da seção. As argilas são maciças com camadas finas, por vezes laminadas, mais ou menos arenosas e com coloração vermelho-amarronzada, que varia desde o vermelho claro até o vermelho tijolo. Mais ao fundo a formação apresenta uma coloração vermelha à roxa. Aparentemente a cor vermelha foi intensificada pelo processo de erosão. As argilas são pouco margosas, particularmente nas partes não arenosas da formação. (TSCHOPP, 1953).

A Formação Tiyuyacu consiste em depósitos fluviais grossos a finos e pode ser dividido em 2 membros (Inferior e Superior) baseado em argumentos sedimentológicos e estruturais. (CHRISTOPHOUL, *et al.*, 2002)

A Formação Ortequaza sobrepe conformemente o Membro Tiyuyacu Superior, a base corresponde à superfície de transgressão regional. Na Bacia Oriente a Oeste (aproximadamente na zona Subandina), a Formação Ortequaza consiste de depósitos fluviais finos similares a Formação Chalcana (CHRISTOPHOUL *et al.*, 2002).

Na Formação Chalcana a maior parte dos sedimentos encontrados na seção do rio Aguarico são depósitos finos (argilitos, siltitos) intercalados com lentes finas de arenitos com granulometria fina a média. Poucas estruturas sedimentares puderam ser identificadas. A base da formação corresponde a uma inconformidade e consiste de depósitos fluviais de grãos finos (CHRISTOPHOUL *et al.*, 2002).

4.5 Sistemas Petrolíferos

4.5.1 Rocha Geradora

O potencial gerador das formações pré-cretácicas na Bacia Oriente é muito incerto; todavia, não se pode descartar a possibilidade de que o “Pré-Cretáceo” pode conter rochas geradoras que tenham efetivamente gerado hidrocarbonetos, ou seja, que tenham entrado na janela de geração.

As zonas ricas em matéria orgânica da Formação Napo são consideradas as fontes de quase todos os hidrocarbonetos na Bacia Oriente, embora a correlação do óleo com a fonte fosse mal documentada na literatura (LOZADA *et al.*, 1985; RIVADENEIRA, 1986; DASHWOOD & ABBOTTS, 1990 *apud* HIGLEY, 2000), principalmente para o caso da Formação Hollin, que é situada a baixo da formação Napo, o que sugere uma migração do tipo *downward*, fato pouco provável já que a gênese da bacia esteve associada à sedimentação em paleo-ambiente saturado em água.

A Formação Pumbuiza reúne as condições de deposição necessárias para ser considerada como uma potencial rocha geradora, porém no Equador, os resultados geoquímicos não confirmam isto. Os eventos orogênicos do ciclo Eo-Herciniano submeteram essas rochas a pressões e temperaturas muito altas, passando da janela de geração de óleo, fazendo com que essa formação seja geradora de gás seco (ALVARADO *et al.*, 1982).

A Formação Macuma, segundo os dados geoquímicos registrados no centro da bacia (poços Sacha Profundo, Shushufindi A-39 e Pichincha-1), não pode ser considerada como uma boa rocha geradora, apesar de seu ambiente de deposição ser interpretado com quente tendendo a anóxico, o que poderia contribuir para preservação da matéria orgânica, pois em todo o mundo se registrou baixo desenvolvimento de rocha geradora em depósitos marinhos no Permo-Carbonífero (EMERY & MYERS, 1997).

A Formação Santiago, segundo RIVADENEIRA (1986), e de acordo com as análises geoquímicas realizadas em amostras da Cordilheira de Cutucú (COT = 1,3-2,52% e Ro = 0,84-1,87%; ALVARADO *et al.*, 1982) apresentam níveis de pelitos negros com boas características quantitativas e qualitativas para rocha geradora. A espessura da formação é estimada entre 1000 e 2700 m. É uma seqüência de calcáreos e calcáreos arenosos intercalados com folhelhos micácios e betuminosos. Aparecem também algumas intrusões de rocha ígnea félsica e diabásios. A idade da formação varia desde o Triássico ao Jurássico.

A Formação Napo é dita na literatura como a maior responsável pela geração de óleo na Bacia Oriente.

As análises dos dados sedimentológicos e da matéria orgânica particulada da área do campo Pungarayacu, especificamente nas formações Napo Basal e Napo Inferior indicam um importante aporte terrígeno de fitoclastos e palinomorfos (superior a 90%), depositado durante o trato de e sistema de mar baixo bem desenvolvido.

Já nas formações Napo Médio e Superior, a assembléia orgânica é caracterizada pela alta abundância de matéria orgânica amorfa bem preservada e um decréscimo geral de material terrígeno o que proporcionou altos valores de carbono orgânico total, atingindo entre 9,8 - 12% em condições anóxicas. Isso intensificou a preservação da matéria orgânica, produzindo rochas geradoras de alta qualidade.

No intervalo correspondente ao Napo Médio, níveis inferiores de calcáreos são caracterizados pela abundancia da matéria orgânica amorfa (MOA mais de 70%) bem preservada associada com altos valores de COT (10-12%).

O óleo da geradora cretácea Napo da Bacia Oriente é correlato com óleos cretáceos da Bacia Marañon (MATHALONE & MONTOYA, 1995).

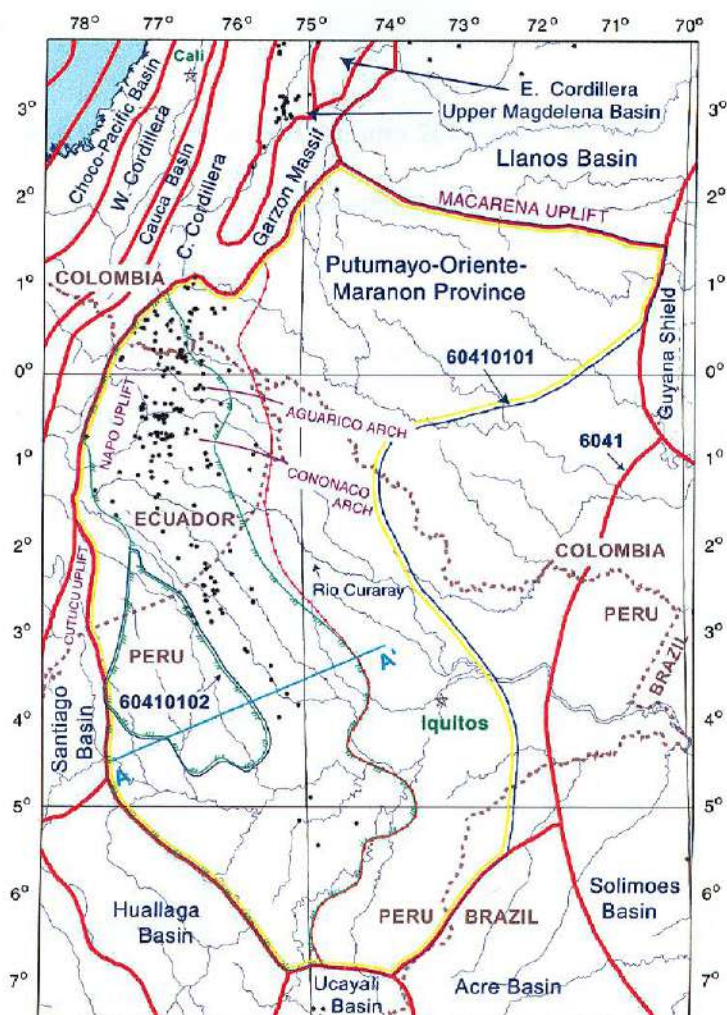
4.5.2 Migração

São vários os processos que têm afetado a migração dos hidrocarbonetos distribuídos nos reservatórios da Bacia Oriente:

- Pré-Mioceno (começo da fase Andina) envolve migração lateral de óleo do oeste (por mais de 300 km).
- Influxo de água doce do oeste, no Pré-Mioceno, causando lixiviação e biodegradação dos óleos trapeados e em migração.
- Em alguns reservatórios ocorrem fluxos de água.
- Influxo de água doce, durante o fim da fase Andina, resultou em lixiviação e biodegradação do óleo em reservatórios pouco espessos. Durante esta fase a subsidência da bacia para sudoeste causa re-migração local e um estágio tardio de geração de hidrocarboneto.

A maior parte da produção na Província Putumayo-Oriente-Marañon está na zona de rochas termalmente maduras, sugerindo que a migração é primeiramente vertical, com uma limitada migração lateral (Figura 17).

Existe um potencial para migração de hidrocarbonetos na direção leste, ao longo de sistemas fluviais da Formação Napo.



EXPLANATION

- ~ Hydrography
- Shoreline
- Geologic province boundary
- - - Country boundary
- + Oil field locations
- Location of figure 2 cross section

ASSESSMENT DATA

- 60410101 — Assessment unit polygons and code
- Minimum Petroleum System polygon
- Total Petroleum System 604101 polygon
- Boundary of the pod of active source rocks. Ticks indicate side of presence

Figura 17 – Na Província Putumayo-Oriente-Marañon, a região de maturação termal para óleo (para dentro do polígono de linha de contorno verde) e para gás (para fora da linha) geração de rochas geradoras do Cretáceo, e locais de produção de campos. Fonte: HIGLEY (2000).

4.5.3 Reservatório

Na Bacia Oriente foram descobertos até o ano 2001 cerca de 100 campos de óleo, dos quais 59 se encontram em produção, 12 estão fechados e 31 campos descobertos ainda não desenvolvidos (BABY *et al*, 2004).

Os principais reservatórios produtivos da bacia são Hollín do Aptiano -Albiano médio, do Albiano superior, do Cenomaniano superior e do Campaniano. São compostos em suas partes inferiores por arenitos quartzosos, geralmente limpos, com porcentagens menores de feldspatos. Acima, as litofácies areno-argilosas transgressivas tornam-se quartzo-glauconíticas e calcárias.

Dentre os reservatórios marginais carbonáticos do Cenomaniano, a única produção comercial se obteve do poço Charapa 1, que produziu óleo de 29-30° API (VHR) (BABY *et al*, 2004).

Esta bacia tem sido segmentada em três unidades tectônicas, que por sua vez constituem “plays” com características particulares em suas trapas, jazidas e óleos (BABY *et al*, 2004).

No “play” ocidental subandino, o óleo Hollín do campo Bermejo é o óleo de melhor qualidade da bacia tanto pelo seu grau API quanto por ter o menor conteúdo de enxofre (0,32-0,44%), níquel (1,7-3,8 ppm) e vanádio (1,3-10,1 ppm) em peso. Este segmento possui reservas de 5400 milhões de barris de óleo “in place”.

No “play” Central Sacha-Shushufindi, os óleos leves e medianos predominam no norte, destacando-se os óleos do reservatório de Secoya, Atacapi, Frontera, Shushufindi e Shuara por seu baixo conteúdo de enxofre (BABY *et al.*, 2004).

Os óleos pesados desenvolvem-se na direção sul. No norte do “play” oriental, predominam os óleos com grau API médio, com menos de 1% de enxofre, entretanto, na direção sul deste “play” se desenvolveram os óleos pesados (Bogui-Capirón, Apaika, Amo,

Tiputini, Ishpingo, Tambococha) com alto conteúdo de enxofre, que ultrapassa os 2% (BABY *et al.*, 2004).

4.5.4 CARACTERIZAÇÃO DOS RESERVATÓRIOS PRINCIPAIS DAS TRÊS UNIDADES TECTÔNICAS

4.5.4.1 O “play” ocidental (sistema subandino)

Contêm apenas 4 campos: Bermejo (o único em produção), Rubi, Pungarayacu e Oglán. Onde se tem acumulado 5400 milhões de barris que representam um total de 18% do total de petróleo “in place” na bacia (BABY *et al.*, 2004).

Os únicos óleos leves conhecidos neste play se encontram no campo Bermejo, localizado perto da fronteira com a Colômbia (BABY *et al.*, 2004).

Sua localização distal, a respeito da área fonte, faz com que este seja o “play” com menor quantidade de reservatórios arenosos: Hollín é o principal reservatório, seguido de Hollín Superior (o Arenito Basal Napo) e Tena Basal.

O campo Bermejo foi descoberto por Texaco, operadora do consórcio Texaco-Gulf, com a perfuração do poço Bermejo Norte 1 iniciada em 29 de Abril de 1967. A produção do Campo de Bermejo se procedeu em Agosto de 1984, com 329 bpd (média mensal). Em Janeiro de 1986, alcançou para o período em que foi operado, pelo CEPE (Corporação Estatal Petrolera Equatoriana) e Petroducción, o pico máximo de produção com 7625 bpd. Em julho de 1999, produzia 3769 bpd. Depois de sua qualificação como campo marginal foi entregue a uma companhia privada, que conseguiu elevar a produção em torno de 7000 bpd. No segmento Hollín Superior a produção de gás é de 1010 bpd (barris de petróleo por dia) de 36° API no Hollín Inferior (BABY *et al.*, 2004).

O óleo Hollín tem um grau API de 34° e o óleo proveniente do reservatório Tena Basal de 30°.

Outro campo muito prolífico que ainda foi colocado em produção é o campo de Pungarayacu.

A CEPE realizou o levantamento geológico na área desse campo entre o final dos anos 70 e início dos anos 80. Com o fim de quantificar a acumulação de óleo, iniciou a perfuração dos 26 poços de pesquisa (1980) com amostragem de testemunhos, sendo sua profundidade final de 375 m (BABY *et al.*, 2004).

Este campo tem a maior acumulação de óleo “in place” da bacia com cerca de 4000 milhões de barris segundo um estudo desenvolvido pela Cia. Arco em 1992 (BABY *et al.*, 2004).

4.5.4.2 O “play” central (corredor sacha-shushufindi)

É o mais prolífico da bacia e concentra o maior volume de petróleo “in place” (15500 milhões de barris), que corresponde cerca de 54% do total descoberto na bacia. A distribuição do óleo neste “play” mostra certa zonificação: na parte Norte e Centro-Norte, se localiza a grande maioria dos campos com óleos leves e médios, enquanto que a Centro-Centro Sul, o óleo vai se tornando médio a pesado (BABY *et al.*, 2004).

Este, assim como os anteriores é um “play” com alta concentração de reservas de óleo. Cerca de 51% do total do petróleo original “in place” do mesmo se acumula em seus três maiores campos: Shushufindi, Sacha e Libertador (Figura 18) (BABY *et al.*, 2004).

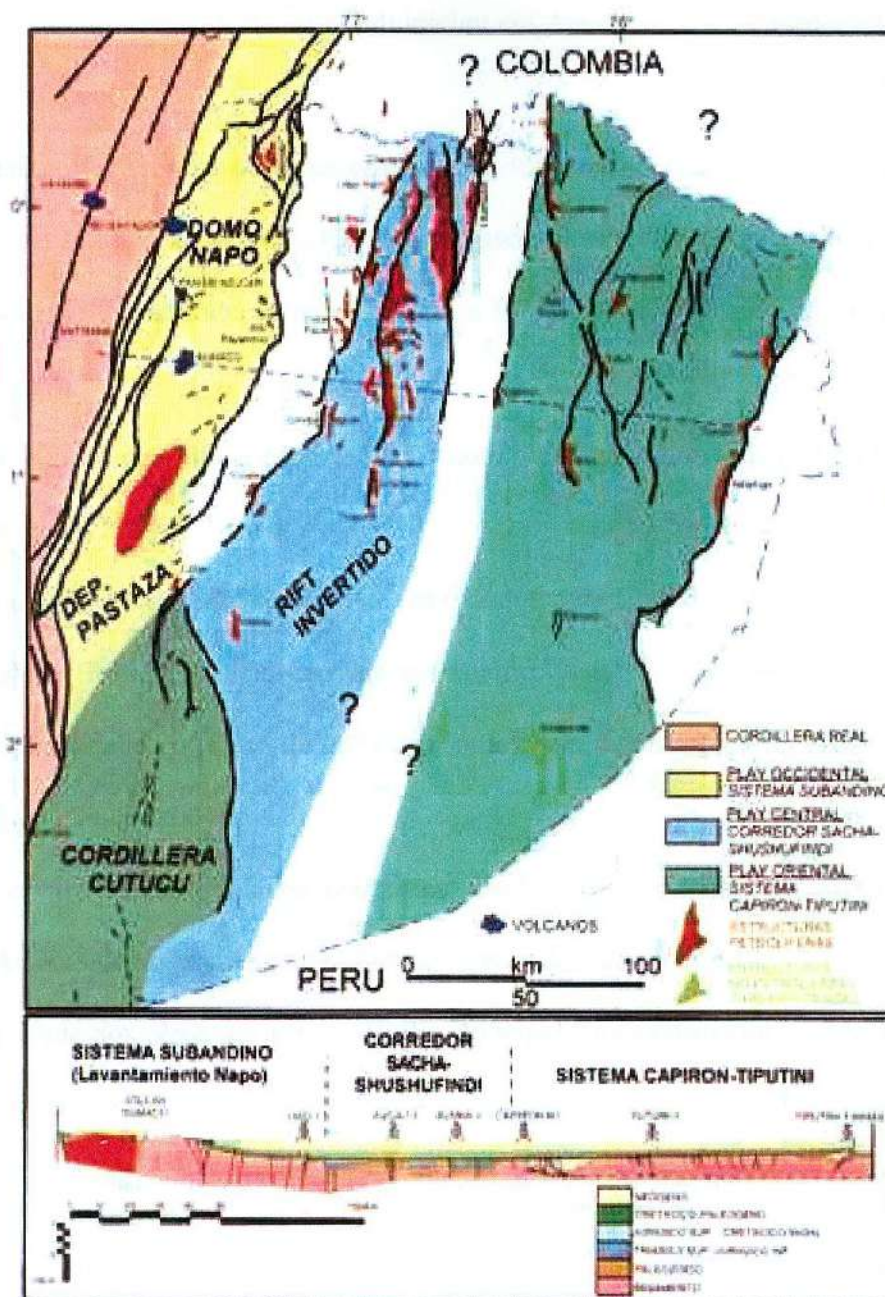


Figura 18 – Mapa e seção estrutural da Bacia Oriente com seus três corredores estruturais-petrolíferos. Fonte: BABY et al (2004).

Apesar de ser um “play” maduro do ponto de vista exploratório, sua prospectividade ainda é alta, graças à totalidade de suas trapas serem antigas (Cretáceo Tardio-Paleoceno e Eoceno), e por tanto qualquer estrutura mapeada dentro do seu domínio tem uma alta probabilidade de ser importante para o trapeamento (BABY et al., 2004).

A produção do campo de Shushufindi iniciou em Agosto de 1972 e atualmente existem por volta de 120 poços.

Este campo teve reservas iniciais provadas de 1590 milhões de barris, que representam 21,5% de todas as reservas da Bacia Oriente, restando ainda cerca de 600 milhões de barris para ser produzidos. Sua produção total equivale a 35% do total produzido no país (BABY *et al.*, 2004).

O grau API do óleo flutua entre 24° e 32° com predomínio dos óleos com menos de 30° API. (BABY *et al.*, 2004).

No campo Sacha a produção inicia-se em 6 de Julho de 1972.

A unidade Hollín Principal consiste em arenito quartzoso, de granulometria média a grossa com porosidade em torno de 18% com ocasionais intercalações de níveis lamosos e argilosos (BABY *et al.*, 2004).

Os reservatórios são areníticos quartzosos com feldspato e fragmentos líticos em menor proporção. A porosidade descrita é intergranular e seu valor médio é de 17.

A qualidade dos óleos das jazidas Hollín Principal, Hollín Superior e Tena Basal varia entre 27 e 29° API.

No campo Libertador as perfurações começaram em 1980 nas estruturas Secoya, Shuara e Shushuqui.

A produção iniciou em Julho de 1982. Em Agosto de 1992, o campo alcançou seu pico máximo de produção com uma média de 56651 bpd. Atualmente, tem uma produção diária média de cerca de 30 mil bpd e o óleo tem em média 30° API.

4.5.4.3 O "PLAY" ORIENTAL (SISTEMA CAPIRÓN-TIPUTINI)

Acumula-se na borda oriental da bacia cerca de 7600 milhões de barris, que equivale aproximadamente 28% do petróleo original "in place". Mostra certa distribuição areal na qualidade dos óleos, com predomínio dos óleos medianos para NNO, e os óleos pesados em direção ao centro e leste. Para o sul, perto da fronteira com o Peru, se encontram vários campos com óleos pesados e medianos.

O campo de óleo pesado Ishpingo (Figura 18), o maior deste "play" concentra 34% do petróleo "in place" do "play" (2700 milhões de barris). Seguem em ordem decrescente os campos Yuturi e Iro com cerca de 6000 milhões de barris de petróleo "in place" cada um, Tiputini e Amo com volumes de óleo "in place" entre 400 e 500 milhões de barris.

4.5.4.3.1 Os campos Ishpingo, Tambococha e Tiputini ("trend" ITT)

Os campos Ishpingo, Tambococha e Tiputini se localizam no extremo da Bacia Oriente (ver Figura 1), dentro do "play" oriental definido por BABY *et al.* (1999). São acumulações de óleo pesado entre 12 e 16° API, com um volume original de petróleo "in situ" de cerca de 34000 milhões de barris, que constitui a maior acumulação de óleo pesado da Bacia Oriente.

Todos os óleos analisados sobre a base das relações pristano/fitano, pristano/C17 e fitano C18, são de origem marinha, variando a importância do aporte continental em maior ou menor grau. A única exceção é o extraído do reservatório "U" do poço Ishpingo 2, que mostra uma relação Pr/Fi maior que 1 que indica maior aporte terrestre da matéria orgânica geradora do óleo. As tendências de maturidade termal variam entre baixas e moderadas, e mostram um grau variável de degradação.

4.5.5 TRAPAS OU ARMADILHAS

4.5.5.1 Trapas do “play” ocidental (sistema subandino)

Os anticlinais Bermejo constituem a parte ocidental de uma estrutura em flor, associada a grande falha de Frente Subandino. A estrutura tem uma idade maastrichtiana como evidencia a *variação de espessuras entre sua parte oriental superior e o lado ocidental inferior*, que indica um crescimento sin-sedimentar da mesma ao tempo Tena Inferior. O levantamento Bermejo esta sendo afetado com a última reativação tectônica, que provocou a erosão dos níveis Terciários.

O anticlinal principal conhecido como Bermejo Sul está limitado por uma falha com forma de meia lua, de orientação NNE-S-SSE, e o anticlinal Bermejo Norte está limitado ao ocidente por outra falha paralela que se extingue na direção sul.

4.5.5.2 Trapas do “play” central (corredor Sacha-Shushufindi)

A maioria dos campos se desenvolveu em estruturas de relevo estrutural suave, mostrando um relevo mais pronunciado nas estruturas Sacha, Shushufindi, Lago Agrio, Cononaco e algumas outras, limitadas por falhas de forte caimento que em alguns casos formam acima estruturas em flor.

No campo Sacha a trapa é um anticlinal de direção NNE-SSO cortado em seu flanco oeste por uma falha transpressional dextral. Localiza-se no flanco ocidental do “play” central (corredor Sacha-Shushufindi). Tem uma largura de 4 Km ao norte e cerca de 7 km ao centro e sul, e um comprimento de 33 km. Apresenta um fechamento vertical máximo de cerca de 240 metros na base do calcáreo “A”. Sua formação ocorre na primeira etapa da inversão tectônica entre o Turoniano Terminal e o Maastrichtiano, como mostra a *variação da espessura das formações Napo Superior e Tena entre o flanco ocidental e o alto da estrutura*.

Abaixo da estrutura Sacha de idade Cretáceo, se desenvolveu o anticlinal “sacha profundo” de possível idade Jurássica Inferior-tardío a Médio, que dobrou os depósitos Paleozóicos e Triássicos-Jurássicos da Formação Sacha (Santiago-equivalente) o mesmo foi provado com o poço Sacha-Profundo-1 sem resultados positivos.

A estrutura do campo Libertador tem forma de caixão, com 4 subestruturas alinhadas em um eixo N-S: no eixo oriental se alinham as estruturas Pacayayu e Shuara e no ocidental as estruturas Shushuqui e Secoya, fundindo-se a sul configurando (fechando) o periclinal Pechincha-Carabobo.

4.5.5.3 Trapas do “play” Oriental (sistema Capirón-Tiputini)

As estruturas petrolíferas estão associadas a anticlinais falhados, desenvolvidos sobre semigrabens Jurássicos (DÍAZ *et al.*, 2000), produto de uma inversão tectônica do Eoceno precoce ou de varias reativações como no caso do “trend” Ishpingo-Tambococha-Tiputini, que experimento uma primeira inversão Eocénica-tardia e a última recente (DÍAZ *et al.*, 2000). A maioria das falhas são listricas e segundo a informação sísmica tem um nível “despegue” no embasamento (BALKWILL *et al.*, 1995).

O “trend” estrutural Ishpingo-Tambococha-Tiputini-Imuya é um sistema transpressional, associado à falha regional Yasuní de orientação NNE-SSO, na altura da estrutura Imuya – a norte -, apresenta um falhamento de orientação NNO-SSE. A falha principal é de alto ângulo na superfície, diminuindo seu mergulho e tornando-se listrica a baixo da seqüência Cretácea. O anticlinal Tiputini mostra uma direção NNO no seu eixo, divergente a orientação da falha principal NNE-SSO, mostrando a morfologia típica de uma dobra em um contexto transpressivo.

São estruturas antigas como mostra a deformação sin-sedimentar de Tiyuyacu Inferior (em algumas seções, se observa indícios de uma primeira reativação Cretáceo tardio, que afeta

Napo Superior e a Formação Tena). A última reativação se iniciou provavelmente no Mioceno-Plioceno, e se continua até o presente, já que a falha alcança a superfície como se observa em várias seções sísmicas, deformando os depósitos mais recentes.

4.5.6 Rochas Selantes

Períodos alternados de transgressão e regressão resultaram na deposição de rochas reservatórios e rochas selantes Cretáceas interbandadas sobre uma grande parte do Noroeste da América do Sul. A superfície de inundação (transgressão máxima) ocorre durante o Turoniano-Santoniano e foi marcado pela deposição da Formação Napo (MACELLARI & VRIES, 1987). As rochas selantes para os reservatórios Hollin do Cretáceo Inferior são xistos marinhos, interbandados da Formação Napo na base e uma seqüência condensada de calcáreos e folhelhos no topo da Formação Napo.

A principal rocha selante para os arenitos da Formação Napo são os depósitos em inconformidade Maastrichtiano-Paleoceno da Formação Tena.

As possíveis rochas selantes para os reservatórios fluviais da Formação Tena são depósitos interbandados pelíticos e possivelmente fácies de baixa permeabilidade da Formação Tiyuyacu depositados em inconformidade.

5 MÉTODOS MAGNÉTICOS

5.1 Introdução

As primeiras observações dos fenômenos magnéticos foram feitas pelo filósofo grego Thales no ano de 600 a.C. Os chineses também conheciam os fenômenos magnéticos, especula-se que eles tenham descoberto o fenômeno da orientação da magnetita e assim construído a bússola magnética por volta de 1100 d.C. No entanto, foi somente em 1600 com a publicação do livro *De Magnete* de Willian Gilbert que os fenômenos magnéticos foram estudados de maneira mais científica. No seu livro, Gilbert fez a primeira investigação sobre o magnetismo terrestre e mostrou que o campo magnético da Terra pode ser aproximado pelo campo de um ímã permanente que se encontra num sentido norte-sul próximo ao eixo de rotação da Terra. (TELFORD *et al.*, 1990).

Durante muito anos acreditou-se que os fenômenos magnéticos não tinham relação com os fenômenos elétricos até que o físico Oersted, em 1820, verificou que a agulha de uma bússola se movia quando da passagem de uma corrente elétrica por um condutor. A partir desta observação passou-se a acreditar que os fenômenos elétricos e magnéticos eram da mesma natureza, surgindo assim o eletromagnetismo. Mas foi somente em 1864 que Maxwell, com seu conjunto de equações conhecidas como equações de Maxwell, conseguiu reunir os fenômenos elétricos e magnéticos num só ramo chamado de eletromagnetismo.

A primeira aplicação dos métodos magnéticos em prospecção teve seu início em 1879 com a publicação de *The examination of the Iron Ore Deposits by Magnetic Measurements* por Thalén. (TELFORD *et al.*, 1990).

Na segunda guerra mundial foi construído o magnetômetro fluxgate, inicialmente desenvolvido para detectar submarinos a partir de um avião. Após a guerra esse aparelho iniciou uma nova era no uso das medidas aeromagnéticas na indústria de exploração. Como novos aparelhos foram sendo desenvolvidos de 1950 até 1970 a sensibilidade foi aumentada de 1 nT ($1 \text{ nT} = 10^{-9} \text{ T}$), para o magnetômetro de precessão de próton, para 0,001 nT, com o magnetômetro de bombardeamento óptico (NABIGHIAN *et al.*, 2005). Devido à alta sensibilidade dos aparelhos até então desenvolvidos os erros nas medidas aeromagnéticas eram oriundos de fatores como precisão na localização, erros de manuseamento, variações temporais do campo magnético entre outros fatores externos. O desenvolvimento do gradiômetro destacou o problema do ruído da manobra causado pelo campo magnético ambiente da plataforma e pelas correntes induzidas na plataforma ao mover-se no campo magnético da Terra. O gradiômetro pode ser utilizado em levantamentos terrestres ou aéreos e consiste de dois magnetômetros verticalmente separados de 1 a 25 m que medem o gradiente vertical do campo total. A diferença nas leituras não dá apenas o gradiente vertical, mas também, em grande extensão, remove os efeitos da variação temporal do campo. Com o uso do GPS (Global Positioning System), iniciado no início de 1990, os erros na precisão da localização foram drasticamente reduzidos. Atualmente as pesquisas aeromagnéticas de alta resolução (HRAM) são consideradas a indústria padrão nos levantamentos magnéticos. (NABIGHIAN *et al.*, 2005)

Os levantamentos magnéticos são feitos, na maioria dos casos, em conjunto com medidas gravimétricas devido ao fato de serem efeitos semelhantes, pois ambos obedecem a uma lei de força do tipo inverso do quadrado da distância. Após as medidas magnéticas serem feitas efetua-se o processamento dos dados, com a remoção do IGRF (ver seção 5.7.2) de efeitos de campos externos e posteriormente a aplicação de filtros que visam separar dos dados medidos as anomalias magnéticas de maior interesse. A etapa seguinte corresponde à

interpretação dos dados, cujo objetivo é obter um modelo geológico com informações sobre os materiais magnéticos da subsuperfície, a partir dos dados magnéticos processados. A interpretação moderna envolve uma síntese complexa de múltiplos aspectos: os resultados da análise magnética, conhecimento geológico da área de estudo, um entendimento das propriedades magnéticas das rochas, integração com outros dados independentes, caracterização das formas das anomalias e identificação da contribuição da topografia. (NABIGHIAN *et al.*, 2005).

Os levantamentos magnéticos são métodos rápidos e rentáveis de se fazer prospecção e são dos mais utilizados. Eles têm muita utilidade para fins científicos e de prospecção de minérios, podem ser utilizados também para a prospecção de hidrocarbonetos e são utilizados também para investigação arqueológica.

5.2 Teoria Elementar e Conceitos Básicos

A teoria clássica do magnetismo é similar à teoria clássica da gravidade e da eletricidade, seu conceito básico é que os monopolos magnéticos se comportam de maneira análoga às cargas elétricas e às massas pontuais, ou seja, eles também obedecem a uma lei de força do tipo inverso do quadrado da distância entre monopolos magnéticos. Apesar de sua existência ainda não ter sido verificada experimentalmente, o conceito é muito útil em cálculos de campos internos de amostras e fenômenos relacionados como estrutura de domínios magnéticos (NOVAK, 2002).

Define-se, de maneira análoga a lei de Coulomb, pela força \vec{F} entre dois monopolos magnéticos separados de uma distancia r

$$\vec{F} = \frac{p_1 p_2}{\mu r^2} \hat{r}$$

onde \vec{F} é a força (medida em dinas) sobre p_2 devido a p_1 . μ é a permeabilidade magnética (uma propriedade do meio que será explicada posteriormente) r é a distância entre os monopolos e \hat{r} é um vetor unitário dirigido de p_1 a p_2 .

Do mesmo modo que a força elétrica, a força magnética pode ser atrativa ou repulsiva dependendo do sinal dos monopolos magnéticos. A regra é a mesma para o caso das cargas elétricas: monopolos de mesmo sinal se repelem e de sinais contrários se atraem. A convenção para a atribuição do sinal é que um mono-pólo positivo (negativo) é atraído em direção ao pólo norte (sul) magnético da Terra.

O campo magnético \vec{H} é definido, de maneira análoga ao campo elétrico, como sendo a força por unidade de pólo magnético.

$$\vec{H} = \frac{\vec{F}}{p},$$

onde \vec{H} é medido em Oersteds, em unidade cgs.

Um dipolo magnético é visto como sendo dois monopolos $+p$ e $-p$ separados por uma distancia de $2l$. O momento de dipolo magnético, m , definido como

$$\vec{m} = 2lp\hat{r}$$

onde m é um vetor na direção de \hat{r} que vai do pólo negativo para o positivo.

O campo magnético pode ser causado pelo fluxo de uma corrente elétrica em um condutor como expresso pela lei de Gauss (que é uma das equações de Maxwell do eletromagnetismo), ou pela lei de Biot-Savart.

Uma corrente elétrica fluindo em um condutor circular, uma espira, age como um dipolo magnético localizado no centro da espira. Da mesma forma, o movimento dos elétrons em órbita em torno do núcleo atômico constituem correntes circulares e fazem com que os átomos também tenham momentos magnéticos. Além disso, os elétrons também possuem *spins* que contribuem, com uma parcela muito maior, para o seu momento magnético. Quando um corpo

magnetizável é colocado na presença de um campo magnético externo ele torna-se magnetizado por indução; a magnetização é devida à reorientação dos átomos e moléculas de modo que seus *spins* se alinhem. Define-se a magnetização \vec{M} como sendo o somatório de todos os momentos magnéticos por unidade de volume

$$\vec{M} = \frac{\sum m}{V}$$

Para campos magnéticos pequenos a magnetização é diretamente proporcional ao campo magnético \vec{H} . Onde a constante de proporcionalidade é a susceptibilidade k .

$$\vec{M} = k\vec{H}$$

A indução magnética \vec{B} é o campo total incluindo o efeito da magnetização e pode ser escrita como

$$\vec{B} = \mu_0(\vec{H} + \vec{M})$$

A indução magnética em um ponto P pode ser caracterizado pela sua intensidade, \vec{B} , e pelos ângulos de inclinação I e declinação D naquele ponto conforme mostra a Figura 19.

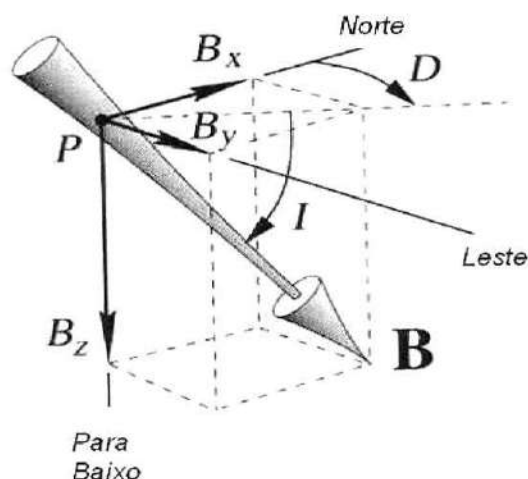


Figura 19 – Campo magnético total e suas componentes (BLAKELY, 1995 apud PETROBRAS, 2007).

5.2.1 CLASSIFICAÇÃO DOS MATERIAIS MAGNÉTICOS

A resposta magnética das rochas e dos minerais é determinada pela quantidade e pela susceptibilidade dos materiais magnéticos presentes. A susceptibilidade magnética é uma medida da resposta magnética de um material a um campo magnético externo, e é um parâmetro fundamental das rochas na prospecção magnética. Muitas vezes a relação entre \vec{M} e \vec{H} não é linear porque a susceptibilidade depende da intensidade da excitação magnética (ou seja, do módulo de \vec{H}). Como todas as substâncias são magnéticas na escala atômica podemos interpretar o tipo de comportamento de k em termos da estrutura magnética do material. De maneira geral os principais tipos de comportamentos magnéticos conhecidos são: Diamagnetismo, Paramagnetismo, Ferromagnetismo, Antiferromagnetismo e Ferrimagnetismo. O quadro 1 mostra as características de cada um desses tipos de comportamentos magnéticos.

Quadro 1 – *Classificação dos materiais magnéticos de acordo com seus valores de susceptibilidade e permeabilidade magnética.*

Material	Susceptibilidade k	Permeabilidade μ
Diamagnético	< 0	< 1
Paramagnético	> 0	> 1
Ferromagnético	$\gg 0$	$\gg 1$
Antiferromagnético	> 0	> 1
Ferrimagnético	$\gg 0$	$\gg 1$

5.2.1.1 Diamagnetismo

O Diamagnetismo representa uma quase ausência de magnetismo natural para o qual a magnetização induzida é oposta à direção do campo magnético \vec{H} . Isto acontece devido à alteração do movimento orbital dos elétrons, que tendem a produzir um campo que se opõe ao campo indutor. O diamagnetismo é uma propriedade de todos os materiais que tem cargas elétricas em movimento, quando sujeitos à influência de um campo magnético externo, embora não possa ser observado devido à existência de outras formas de magnetismo mais intensas. Os materiais diamagnéticos são caracterizados por possuírem uma susceptibilidade natural negativa e muito pequena da ordem de -10^{-6} . Nestas substâncias o campo externo não tem efeito sobre o *spin* dos elétrons porque os átomos destes materiais têm um número par de elétrons e, portanto, os campos magnéticos devido aos *spins* se anulam.

5.2.1.2 Paramagnetismo

Os materiais paramagnéticos caracterizam-se por terem uma pequena susceptibilidade positiva variando de 10^{-4} a 10^{-6} e dependendo da sua origem possuem uma forte dependência com a temperatura. Nos materiais paramagnéticos os orbitais estão incompletos e os momentos dos *spins* resultantes podem ser alinhados ligeiramente de modo a produzir uma magnetização induzida paralela ao campo aplicado.

5.2.1.3 Ferromagnetismo

Os materiais ferromagnéticos caracterizam-se por apresentarem uma magnetização diferente de zero mesmo na ausência de campo externo aplicado. Isto só é possível devido à

existência de uma interação entre os momentos magnéticos atômicos que os ordena resultando em um momento magnético total não nulo, a chamada *interação de troca*. A susceptibilidade desses materiais é cerca de 10^6 vezes maior que a dos diamagnéticos e paramagnéticos. Devido à agitação térmica, esse efeito diminui com o aumento da temperatura chegando a desaparecer numa temperatura limite T_c , chamada de temperatura de Curie; a partir desta temperatura eles comportam-se como paramagnéticos; As substâncias ferromagnéticas incluem o ferro, o cobalto e o níquel entre outras.

5.2.1.4 Antiferromagnetismo

Nos antiferromagnéticos não existe magnetização espontânea a baixas temperaturas. Abaixo de uma certa temperatura crítica T_N , chamada de temperatura de Néel, a magnetização e a susceptibilidade diminuem com a temperatura tendendo a zero no limite $T \rightarrow 0$. Acima dessa temperatura crítica os materiais antiferromagnéticos comportam-se de maneira semelhante aos paramagnéticos. Este comportamento é devido a um acoplamento antiparalelo de momentos magnéticos iguais e vizinhos que se anulam mutuamente.

5.2.1.5 Ferrimagnetismo

Nos Ferrimagnetos o acoplamento antiparalelo dos momentos magnéticos vizinhos não se anula completamente resultando em um momento magnético global diferente de zero. Para isso pressupõe-se que existam momentos magnéticos mais fortes numa direção que na outra. Os materiais Ferrimagnéticos também possuem uma temperatura crítica T_c . A susceptibilidade desses materiais é da mesma ordem de grandeza dos materiais ferromagnéticos.

5.2.2 Curva de Histerese

A curva de histerese é obtida ao se traçar o gráfico de \vec{B} em função de \vec{H} . Quando um material ferromagnético desmagnetizado é sujeito à ação de um campo externo \vec{H} o campo total \vec{B} cresce com \vec{H} até atingir o valor máximo que a amostra pode ter (saturação). Quando diminuimos o valor de \vec{H} a curva não tem o mesmo caminho anterior e quando \vec{H} atinge o valor zero o campo \vec{B} apresenta um valor positivo, isto é chamado de magnetismo residual ou remanescente. Quando \vec{H} tem seu sentido invertido, \vec{B} chega a zero para um determinado valor negativo de \vec{H} , chamado de *força coerciva*. Em seguida continua-se a diminuir o valor de \vec{H} até que a saturação inversa seja atingida (ou seja, até que \vec{B} alcance seu valor máximo negativo). A outra parte do ciclo é obtida aumentando-se o valor de \vec{H} até o valor de saturação positivo. A curva resultante é chamada de *curva de histerese*. Veja a Figura 20

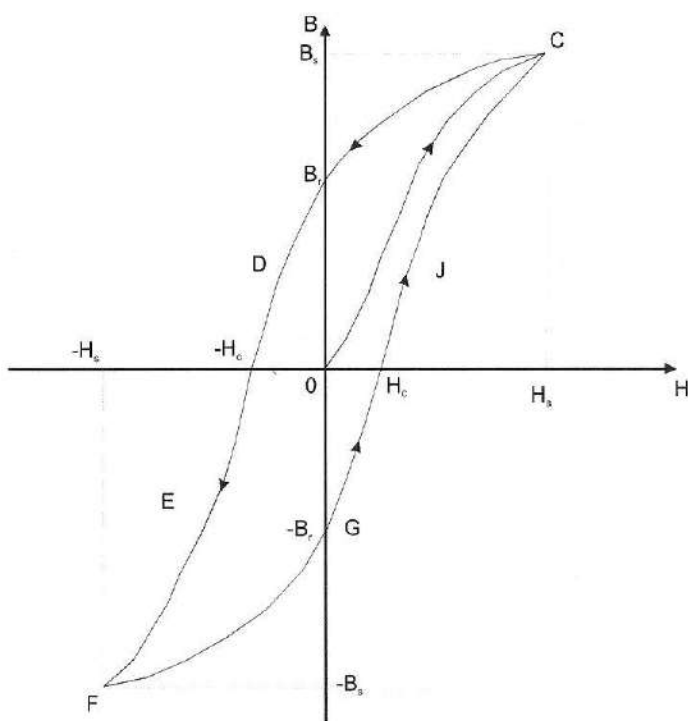


Figura 20 – Curva de Histerese (PETROBRAS, 2007).

5.3 O Campo Magnético da Terra

O campo magnético da Terra constitui-se de três componentes:

1. O campo principal, que varia lentamente e é originado no interior da Terra.
2. Um pequeno campo, que varia mais rapidamente e origina-se no exterior da Terra.
3. Variações espaciais do campo principal, que são comumente menores que o campo principal, são aproximadamente constantes no tempo e no espaço, e são caudadas por anomalias magnéticas locais na crosta próxima a superfície da Terra. Estas anomalias são os alvos na prospecção magnética (TELFORD *et al.*, 1990).

5.3.1 O Campo Principal

O campo principal é o maior componente do campo magnético da Terra correspondendo a 80% ou 90% do campo geomagnético. Acredita-se que é originado pela convecção do ferro líquido presente no núcleo da Terra. Para uma primeira aproximação este campo é dipolar e seu valor é de 50.000 nT. Este campo varia lentamente com o tempo e acredita-se que ele se anula e inverte seu sentido numa escala de tempo da ordem de 100.000 anos. Acredita-se que o a fato do campo principal variar esteja relacionado às mudanças nas correntes de convecção que ocorrem no núcleo da Terra.

5.3.2 O Campo Externo

O campo magnético externo é causado pela interação entre o campo principal e o campo magnético associado com o vento solar (NABIGHIAN *et al.*, 2005). O campo externo é originado na ionosfera e além do vento solar elementos como a rotação da Terra e as

tempestades magnéticas também contribuem para a sua origem. Este campo varia no tempo de forma mais rápida que o campo principal. Um dos efeitos do campo magnético externo é a variação diurna que tem período de 24h, a variação diurna depende da latitude e para médias latitudes varia de 60 nT. Outro efeito do campo externo resulta da interação do vento solar com o campo principal que geram partículas carregadas eletricamente que mantêm um anel de corrente ao longo do Equador, chamado de eletrojato equatorial. Instabilidades neste anel de corrente geram flutuações no campo magnético da ordem de dezenas de nT próximo da superfície da Terra (NABIGHIAN *et al.*, 2005). E por último, próximo dos pólos da Terra, o aprisionamento de partículas carregadas ao longo das linhas de campo criam fortes flutuações no campo durante tempestades magnéticas em escala de tempo de poucas horas e amplitudes que excedem 200 nT (NABIGHIAN *et al.*, 2005).

5.3.3 Anomalias Magnéticas

A componente restante do campo magnético da Terra origina-se de variações nos minerais magnéticos presentes nas rochas próximo à superfície da Terra, onde as temperaturas são inferiores a 580 °C (a temperatura de Curie da magnetita, acima da qual a mesma perde suas propriedades magnéticas). Essa região corresponde a uma espessura de 20 a 30 km da crosta terrestre. Estas anomalias geralmente não persistem sobre grandes distâncias. O campo crustal, sua relação à distribuição de minerais magnéticos dentro da crosta, e a informação que esta relação fornece sobre alvos de exploração são as principais questões do método magnético na exploração (NABIGHIAN *et al.*, 2005).

5.4 Magnetismo das Rochas e Minerais

O magnetismo das rochas depende do campo geomagnético atual e da quantidade de mineral magnético presente. A magnetização das rochas pode ser de dois tipos: magnetização induzida e magnetização residual remanescente. A magnetização induzida é aquela causada pela influência direta do campo magnético da Terra sobre a rocha enquanto que a magnetização remanescente é adquirida ao longo da história geológica da rocha, esta última pode ser adquirida por diversos processos onde os principais são:

Magnetização Termo-remanescente (TRM): Este é o processo mais importante da magnetização remanescente das rochas ígneas. Resulta quando a rocha é resfriada abaixo do ponto de Curie/Néel na presença de um campo magnético externo (comumente o campo magnético da Terra). A direção da magnetização depende da direção do campo externo no tempo e no local onde a rocha sofreu o resfriamento.

Magnetização Detrital (DRM): Esta ocorre durante a deposição de sedimentos finos na presença de um campo externo.

Magnetização Remanescente Química (CRM): Ocorre quando grãos magnéticos sofrem um aumento de tamanho ou mudam de forma como resultado da ação química em temperaturas moderadas, ou seja, abaixo da temperatura de Curie. Este processo é importante durante a formação das rochas sedimentares e metamórficas.

Magnetização Remanescente Isotérmica (IRM): É o resíduo deixado após a remoção de um campo magnético externo. Quedas de raios produzem a magnetização remanescente isotérmica em áreas muito pequenas.

Magnetização Remanescente Viscosa (VRM): É produzida por uma longa exposição a um campo externo. A VRM é mais característica em rochas microcristalinas que em rochas macrocristalinas.

O campo magnético da Terra variou de intensidade e inverteu sua polaridade várias vezes no tempo geológico. Muitas rochas apresentam uma magnetização remanescente orientada numa direção diferente do campo magnético atual da Terra.

5.5 Susceptibilidade Magnética das Rochas e Minerais

Na interpretação geológica de dados magnéticos o conhecimento das propriedades magnéticas das rochas para uma área particular de estudo requer o entendimento da susceptibilidade magnética e da magnetização remanescente (NABIGHIAN *et al.*, 2005). A tabela 1 mostra medidas de susceptibilidade das rochas e minerais.

Tabela 1 – *Susceptibilidades magnéticas das rochas e minerais ($\times 10^{-6}$ no SI) (MIRANDA).*

TIPO	χ (SI)
Dolomite	-12.5 a 44
Calcáreo	10 a 25000
Arenito	0 a 21000
Xisto	315 a 3000
Gneisse	125 a 25000
Serpentinite	3100 a 75000
Granito	10 a 65
Riolite	250 a 37700
Gabro	800 a 76000
Basaltos	500 a 182000
Peridotite	95500 a 196000
Grafite	-80 a -200
Quartzo	-15
Sal gema	-10
Calcopirite	400
Pirite	50 a 500
Hematite	420 a 38000
Pirrotite	1250 a 6.3×10^6
Ilmenite	314000 a 3.8×10^6
Magnetite	70000 a 2×10^7

A partir da Tabela 1 podemos ver que existe uma grande variação e superposição para as susceptibilidades de diferentes tipos de rochas. As rochas sedimentares apresentam os valores mais baixos enquanto que as rochas ígneas apresentam os maiores valores. A susceptibilidade depende da quantidade de minerais ferrimagnéticos presente nas rochas, principalmente a magnetita, e às vezes a titano-magnetita ou a pirrotita. Se estes minerais estão presentes na rocha eles dominarão o comportamento magnético da mesma, desde que esta esteja a uma temperatura inferior a temperatura de Curie.

5.6 Instrumentos de Medidas Magnéticas

Os primeiros dispositivos usados para exploração magnética foram modificações das bússolas marinhas que mediam a inclinação I e a declinação D . Nesta seção será discutido os principais instrumentos de medidas modernos que são: o magnetômetro Fluxgate, de precessão de prótons e o de bombardeamento óptico.

5.6.1 Magnetômetro Fluxgate

Este dispositivo foi desenvolvido durante a segunda Guerra Mundial para ser usado na detecção de submarinos (TELFORD *et al.*, 1990). Após a guerra ele foi imediatamente adotado para a prospecção geofísica e permaneceu como o instrumento de levantamento primário até que o magnetômetro de precessão de próton foi introduzido em 1960 (NABIGHIAN *et al.*, 2005).

O magnetômetro fluxgate consiste essencialmente de dois núcleos de materiais magnéticos, que tem uma alta permeabilidade para baixos campos magnéticos (TELFORD *et al.*, 1990). Os núcleos são dispostos paralelamente e cada um é envolvido por uma bobina

primária e uma bobina secundária iguais, porém enroladas em sentido oposto. As bobinas primárias são ligadas em série e recebem uma corrente alternada de baixa frequência (de 50-1000 Hz). A corrente máxima é suficiente para magnetizar os núcleos ferromagnéticos até o valor de saturação, em polaridades opostas, e duas vezes por ciclo. As bobinas secundárias são conectadas a um amplificador diferencial para medir a diferença entre o campo magnético produzido nos dois núcleos.

Na falta de campo externo, a saturação dos núcleos é simétrica e de sinal oposto próximo ao pico de cada meio-ciclo de modo que a saída das bobinas secundárias se cancelam. A presença de um campo externo com uma componente paralela ao núcleo faz com que a saturação ocorra num meio-ciclo antes do outro, produzindo uma assimetria. A diferença de voltagem de saída nas bobinas secundárias é proporcional à intensidade do campo da Terra. Assim qualquer componente do campo geomagnético pode ser medido mediante a escolha apropriada da orientação dos núcleos do magnetômetro.

5.6.2 Magnetômetro de Precessão de Prótons

Os magnetômetros de precessão de próton surgiram em meados de 1950 e em meados de 1960 e superaram os magnetômetros Fluxgate nas aplicações de exploração. Os magnetômetros de precessão de prótons não precisam de uma orientação inicial, o que é de grande vantagem em relação aos dispositivos anteriores. (NABIGHIAN *et al.*, 2005).

O magnetômetro de precessão de prótons consiste basicamente de um sensor, contendo uma fonte de prótons (água, metanol, álcool etílico, querosene, etc.) e um contador eletrônico. O sensor é submetido a um campo artificial mais forte do que o campo magnético terrestre e com uma direção perpendicular a este. Os prótons são polarizados segundo a resultante dos dois campos, que é virtualmente paralela ao campo artificial. A súbita remoção do campo

artificial faz com que os prótons voltem a se orientar com o campo magnético terrestre, precessionando em torno deste campo com uma frequência denominada de frequência de precessão ou frequência de Larmor,

$$\omega = \gamma_p F$$

onde γ_p é a razão giromagnética do próton, a razão entre o momento magnético e o momento angular de spin. O valor de γ_p é conhecido com uma precisão de 0,001%. E como medidas precisas de frequência são relativamente fáceis, o campo magnético pode ser medido com essa mesma precisão (TELFORD *et al.*, 1990).

O magnetômetro de precessão de próton possui uma alta sensibilidade e não necessita de orientação ou nivelamento. A principal desvantagem é que somente o campo magnético total pode ser medido. Mesmo assim, os magnetômetros de precessão de próton são os mais usados em aplicações terrestres e aéreas (TELFORD *et al.*, 1990).

5.6.3 Magnetômetro de Bombardeamento Óptico

Os magnetômetros de bombardeamento óptico surgiram pouco tempo após os magnetômetros de precessão de prótons. Eles apresentam uma sensibilidade de até 0,01 nT e taxas de amostras de 10 Hz. Devido ao fato de serem mais frágeis que os magnetômetros de precessão de prótons, seu uso como instrumento de campo foi mais restrito aos gradiômetros (NABIGHIAN *et al.*, 2005).

Ele é constituído de um sensor contendo vapor de um gás, geralmente Césio ou Potássio, cujos átomos são distribuídos em dois diferentes níveis atômicos, separados por uma energia equivalente à frequência da luz visível. Na presença de um campo magnético externo, o nível de energia mais estável é degenerado (efeito Zeeman) de uma quantidade proporcional

à magnitude do campo. Para valores de campo ambiente, a degeneração da energia corresponde à frequência na faixa das ondas de rádio (centenas de kHz) (NABIGHIAN *et al.*, 2005).

Incidindo luz de frequência correta através deste vapor, todos os elétrons são forçados para a componente de energia mais alta do estado degenerado. Quando esta absorção é completa a célula de vidro na qual o vapor está contido torna-se transparente porque não existem mais elétrons para absorver a radiação incidente (NABIGHIAN *et al.*, 2005). Em seguida um campo na frequência de rádio é aplicado a célula de vidro se o campo tiver a frequência correta, os elétrons são distribuídos de volta ao nível de mais baixa energia, e a célula torna-se opaca. A frequência correta depende do valor do campo magnético presente, de modo que um campo de frequência de varredura é aplicado, e a frequência precisa na qual ocorre a opacidade é usada para determinar a intensidade do campo magnético ambiente. (NABIGHIAN *et al.*, 2005)

5.6.4 Gradiômetros

Gradiômetros são magnetômetros que possuem dois sensores idênticos, espaçados de uma distância fixa e pequena em relação às fontes de anomalia sob investigação. Nos levantamentos terrestres, a distância entre os sensores é comumente de 1 a 2 m, enquanto nos levantamentos aéreos, é de cerca de 25 m. Os dois detectores medem o gradiente vertical do campo total (TELFORD *et al.*, 1990).

As medidas de gradiente são isentas dos efeitos da variação diurna do campo e dos efeitos de fontes distantes. O gradiômetro é essencialmente formado por um par de magnetômetros de elevada sensibilidade tais como o magnetômetro de precessão de prótons ou o magnetômetro de bombeamento óptico.

5.7 Processamento dos Dados Magnéticos

O processamento inclui tudo que é feito entre a aquisição e a criação de um perfil interpretável, como mapas ou dados digitais. Os principais passos na redução dos dados aeromagnéticos, muitos dos quais também se aplicam a dados terrestres e marinhos, incluem compensação para erros causados pelo campo magnético da plataforma, remoção dos efeitos variantes no tempo dos campos externos, remoção do International Geomagnetic Reference Field (IGRF), nivelamento usando “tie-lines” (linhas de amarração). (NABIGHIAN *et al.*, 2005; PETROBRAS, 2007). Nas seções seguintes serão descritas algumas dessas etapas do processamento dos dados magnéticos.

5.7.1 Compensação

Todas as medidas magnéticas feitas em plataformas móveis estão sujeitas a erros causados pelo campo magnético da plataforma, devido às propriedades magnéticas da mesma ou devido a correntes induzidas durante seu movimento no campo magnético da Terra. (NABIGHIAN *et al.*, 2005).

Em pesquisas feitas em helicópteros e navios estes efeitos são minimizados afastando o sensor em um longo cabo, reduzindo, portanto, os erros causados pelo campo magnético do veículo. (NABIGHIAN *et al.*, 2005).

5.7.2 Remoção do IGRF

Como o campo magnético produzido no interior da Terra em geral é maior que o valor das anomalias magnéticas, que são o fator mais importante na prospecção, é desejável

remover o campo global antes de seu processamento. O modelo mais usado atualmente para esse propósito é o International Geomagnetic Reference Field (IGRF) que foi desenvolvido em 1968 e tornou-se largamente utilizado com o advento dos dados digitais em meados de 1970 (NABIGHIAN *et al.*, 2005). Atualmente o IGRF é atualizado a cada 5 anos e contém coeficientes para predizer o valor do campo do núcleo da Terra até o futuro próximo. O IGRF é calculado para cada ponto do dado antes de qualquer etapa do processamento (NABIGHIAN *et al.*, 2005). A sua remoção dos valores medidos assegura que as anomalias resultantes tenham origem em fontes litosféricas rasas (manto superior e crosta) (PETROBRAS, 2007).

5.7.3 Remoção do campo externo (variação diurna)

Nos levantamentos aéreos ou em terra existe, geralmente, um magnetômetro numa estação base que registra o campo continuamente ou em intervalos iguais. Em seguida a variação diurna do campo é subtraído dos dados do levantamento. A correção diurna do campo magnético pode deixar de ser realizada, se as anomalias produzidas apresentam valores superiores a 500 nT.

Existem consideráveis debates sobre quantas estações base são necessárias para mostrar adequadamente as variações espaciais do campo externo para grandes levantamentos ou quando a área do levantamento está a uma distância considerável da base de operação. No mar, geralmente não é possível ter uma estação base de magnetômetros na área levantada e o problema é ignorado ou as medidas são feitas na forma de gradientes (NABIGHIAN *et al.*, 2005).

5.7.4 Nivelamento

O objetivo do nivelamento é minimizar as diferenças residuais entre linhas adjacentes e os erros de longos comprimentos de onda ao longo de linhas que inevitavelmente permanecem após a compensação e a correção das variações do campo externo pela subtração da estação base. (NABIGHIAN *et al.*, 2005).

Um conjunto de *tie-lines* (linhas de amarração) perpendiculares às linhas de produção geralmente é necessária para o nivelamento. O objetivo das *tie-lines* é manter uma relação coerente entre as linhas ao longo de todo o levantamento (PETROBRAS, 2007). O espaçamento entre as *tie-lines* é geralmente muito maior que o espaçamento entre as linhas de produção (NABIGHIAN *et al.*, 2005). Num levantamento ideal os valores obtidos nas interseções entre as linhas de produção e as *tie-lines* deveriam ser iguais. Porém, devido a erros inerentes ao levantamento, esses cruzamentos apresentam valores diferentes. Essas diferenças são usadas como um indicador da qualidade do levantamento (PETROBRAS, 2007). As diferenças entre os valores do campo nessas interseções são calculadas e são aplicadas correções de modo a minimizar essas diferenças (NABIGHIAN *et al.*, 2005). Existem diversas técnicas de calcular essas correções, a mais comum é calcular uma correção constante para todas as linhas pelo método dos mínimos quadrados, enquanto outros algoritmos deixam fixas as *tie-lines* e ajustam somente as linhas de produção (NABIGHIAN *et al.*, 2005). Porém todos esses métodos são empíricos e não funcionam para todas as circunstâncias.

5.8 Filtragem dos dados Magnéticos

O estágio inicial da interpretação dos dados magnéticos envolve geralmente a aplicação de filtros matemáticos nos dados observados. O objetivo destes filtros varia, dependendo da situação. O propósito geral é melhorar as anomalias de interesse e/ou ganhar alguma informação preliminar sobre localização de fontes ou magnetização. A maioria dos filtros e técnicas de interpretação são aplicáveis a dados tanto gravimétricos quanto magnéticos (NABIGHIAN *et al.*, 2005).

Nas seções seguintes serão descritas as características dos filtros mais utilizados, que são: a separação regional-residual, a redução ao pólo e os filtros de derivadas.

5.8.1 Separação Regional-Residual

A separação Regional-Residual é uma etapa muito importante na interpretação de medidas magnéticas e consiste na determinação de qual parte do campo observado pode ser desprezada para o objetivo de um estudo em particular, a parte Regional, e qual parte é significativa para o objetivo principal da exploração, a parte Residual.

As anomalias residuais são obtidas dos mapas de intensidade magnética total pela subtração das tendências regionais. O processo de separação regional-residual consiste em filtrar dos dados iniciais os dados de pequeno comprimento de onda e eliminar dos gradientes os valores de fundo de amplitude e comprimento de onda maiores.

5.8.2 Redução ao Pólo

Do mesmo modo que as anomalias gravimétricas as anomalias magnéticas dependem da forma do corpo causador. Porém, no caso magnético a anomalia também depende da inclinação e da declinação da magnetização do corpo, da inclinação e da declinação do campo magnético da Terra no local, e da orientação do corpo em relação ao norte magnético (NABIGHIAN *et al.*, 2005).

O método da redução ao pólo transforma a anomalia magnética observada numa anomalia que seria medida se a magnetização e o campo ambiente fossem ambos verticais – como se as medidas fossem feitas no pólo magnético. Este método requer o conhecimento da direção da magnetização, freqüentemente assumida paralela ao campo ambiente, como seria o caso se a magnetização fosse desprezível ou alinhada paralelamente ao campo ambiente. A redução ao pólo é aplicada rotineiramente a todos os dados exceto aos dados coletados em altas latitudes magnéticas (NABIGHIAN *et al.*, 2005).

5.8.3 Filtros de Derivadas

As derivadas verticais de primeira e segunda ordem enfatizam as fronteiras das anomalias que podem ser calculadas no domínio de espaço ou de freqüência. Estes operadores também amplificam ruídos de alta freqüência, e a diminuição gradual das freqüências da resposta é comumente aplicada para controlar este problema (NABIGHIAN *et al.*, 2005).

Muitos dos métodos modernos para detecção de extremidades e estimação de profundidade das fontes baseia-se nas derivadas verticais de segunda ordem (NABIGHIAN *et al.*, 2005). As derivadas verticais põem em evidência a existência de fortes gradientes que

estão relacionados com fontes poucos profundas e permitem localizar as fronteiras dos corpos causadores das anomalias.

5.9 Interpretação dos Dados Magnéticos

A interpretação das medidas magnéticas é semelhante à efetuada para os dados gravitacionais, já que ambos são campos que decaem com o inverso do quadrado da distância. Porém o caso magnético é mais complicado porque o campo geomagnético varia não só em amplitude, mas também em direção, enquanto que o campo gravimétrico é, por definição, sempre vertical. Outra dificuldade nas interpretações dessas medidas é o problema da ambigüidade, em que uma mesma anomalia magnética pode ser causada por diferentes corpos em diferentes configurações, como no caso gravimétrico.

Os dados magnéticos depois de processados e analisados dão informação sobre a distribuição dos materiais magnéticos em subsuperfície. O principal objetivo da interpretação geológica é transformar esta informação em um modelo de características geológicas salientes que não estão expostas. A interpretação geológica moderna envolve uma síntese complexa de múltiplos aspectos: os resultados da análise magnética, o conhecimento geológico da área de estudo, um entendimento das propriedades magnéticas das rochas, integração com outros conjuntos de dados independentes, caracterização geológica das formas das anomalias e identificação da contribuição da topografia (NABIGHIAN *et al.*, 2005).

Na interpretação geológica qualitativa a comparação entre formas característica de anomalias com relação a unidades de rochas particulares ou estruturas geológicas é um dos primeiros passos na interpretação qualitativa de mapas magnéticos. A correlação dos mapas magnéticos com unidades geológicas expostas envolve a comparação com formas de anomalias características de determinados tipos de rochas ou de uma unidade particular de

uma certa área de estudo, e identificação de quebras nos perfis das anomalias, o que pode indicar a presença de estruturas e delinear gradientes (NABIGHIAN *et al.*, 2005).

Na interpretação quantitativa estabelece-se um modelo geológico para as fontes de anomalias e em seguida os resultados do modelo são comparados com os valores medidos. Havendo diferença entre o modelo e o valor medido, os parâmetros do modelo são modificados para que os resultados se ajustem com as medidas. A modificação dos parâmetros do modelo pode ser feita pelo método direto ou inverso.

No método direto o intérprete participa diretamente de todas as etapas do processo, modificando o modelo e comparando sua resposta com os valores medidos. Os corpos geológicos de interesse em prospecção geofísica podem ser modelados por estruturas tridimensionais ou bidimensionais, tanto no método direto quanto na inversão. Alguns dos parâmetros dos modelos que podem ser modificados na tentativa de ajuste com os valores medidos são: a profundidade, a espessura, a atitude, a largura e a localização das anomalias magnéticas.

O método de Inversão refere-se a um procedimento numérico automatizado que constrói um modelo de geologia de subsuperfície a partir de dados magnéticos medidos e de alguma informação a priori. Como é típico para problemas de inversão geofísica, uma solução puramente matemática é não-única (NABIGHIAN *et al.*, 2005). O método de inversão pode ser linear ou não-linear. Um dos problemas mais comuns da inversão não-linear é a estimativa de profundidade das fontes de anomalias magnéticas. Existem diversas técnicas para se estimar a profundidade das fontes magnéticas e, assim, a espessura das bacias sedimentares que se superpõem. No início, essas técnicas de estimativa de profundidades eram de natureza gráfica e se aplicavam somente a anomalias de fontes simples. Na década de 1990, diversos métodos automatizados de estimativa de profundidade de fontes magnéticas começaram a aparecer, muitas dessas técnicas são utilizadas comumente nos dias de hoje (NABIGHIAN *et*

al., 2005). Uma das técnicas mais utilizadas é o método de deconvolução de Euler que consiste em calcular as derivadas de primeira ordem em x, y e z para se determinar a profundidade e localização de vários alvos idealizados (como esferas, cilindros, diques, contatos geológicos, etc) cada um caracterizado por um índice estrutural específico.

Tanto no método direto como na inversão o processo de interpretação será mais rápido quanto mais próximo da distribuição real de susceptibilidades na subsuperfície for o modelo inicial.

5.10 Estudo de caso

O estudo de caso apresentado nesta seção é uma transcrição completa do artigo: *Airborne Gravity and Magnetics Interpretation of the Putumayo and Upper Magdalena Valley, Colombia*. Cujos autores são: J. Ceron e J. E. Bain.

5.10.1 Introdução

A área de estudo deste levantamento é de 40.000 km², com dimensões de 500 km de comprimento e 80 km de largura (área em amarelo na Figura 21). A pesquisa se estende do Rio Putumayo ao longo da fronteira Colômbia/Equador ao Vale de Magdalena além da Cidade de Neiva. A geologia da região é típica da Cordilheira Andeana da América do Sul: montanhas do sudoeste ao nordeste formam bordas naturais ao longo do oeste e nordeste. As áreas do Vale Magdalena e de Putumayo são fisiograficamente distintas e separadas por um cume largo perpendicular ao eixo do vale e montanhas, representando a expressão mais ao sul da Cordilheira Oriental.

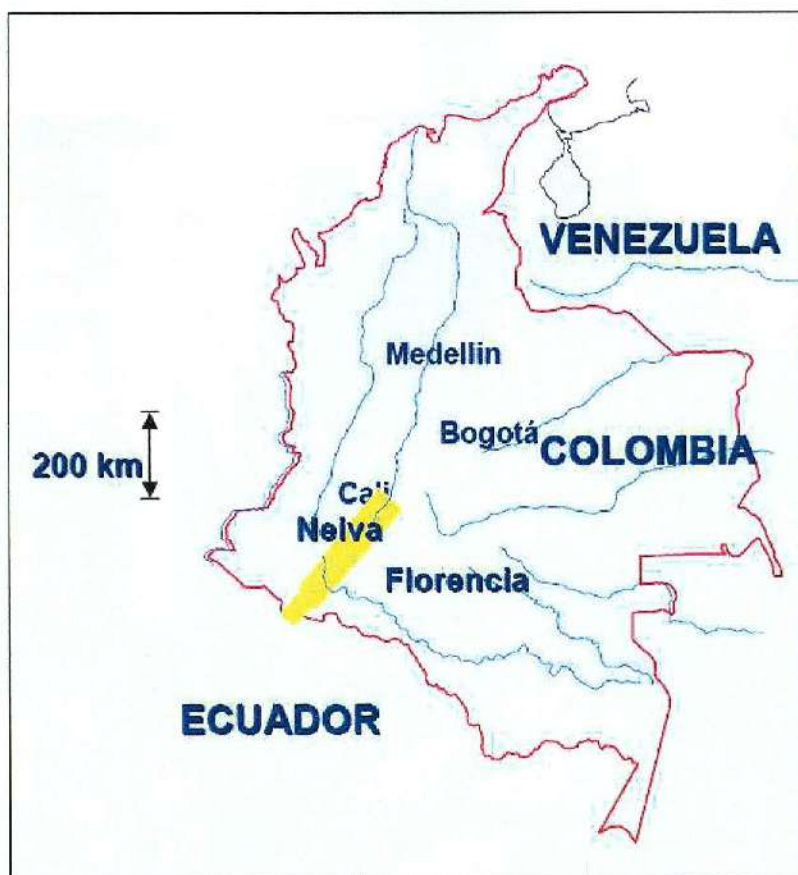


Figura 21 – *Localização da área de estudo.* (CERON *et al.*, 2002)

Aproximadamente 14000 km de dados aéreos de gravidade e magnéticos foram adquiridos em uma altitude constante de 3.048 m *amsl**. Os dados foram adquiridos em menos de 60 dias. Os dados foram adquiridos usando um Cessna Caravan survey aircraft, um medidor de gravidade ZLS-modified LaCoste & Romberg dynamic, tecnologia de GPS e um magnetômetro de vapor de Césio com compensação ativa (Figura 22). Em relação ao tempo, os reflights foram mantidos num mínimo, através do uso de sofisticados métodos de processamento dos dados os quais modelam precisamente os movimentos do avião no pós-processamento.

* do inglês *Above mean sea level*, que significa *acima do nível médio do mar*.

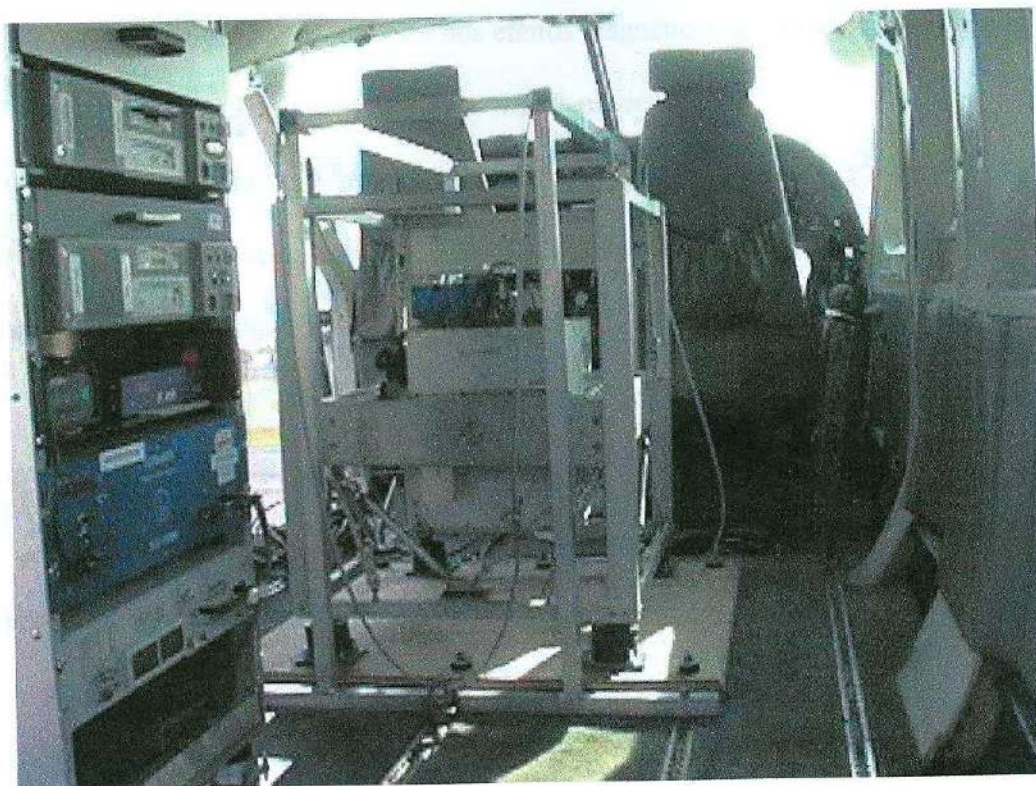


Figura 22 – Equipamento utilizado no levantamento. (CERON *et al.*, 2002)

5.10.2 Objetivos do Projeto e Metodologia

O objetivo desta interpretação foi de definir os principais elementos estruturais e a distribuição das bacias sedimentares ao longo da área de estudo. Os dados gravimétricos e magnéticos podem ser utilizados para se identificar a localização e orientação das principais falhas intra-sedimentares e os limites do embasamento. Os dados magnéticos medidos foram utilizados para se determinar a profundidade e a estrutura do embasamento magnético, o qual, para a área de estudo, coincide com o topo do embasamento cristalino.

A metodologia do projeto envolveu as seguintes etapas:

1. Construção de uma série de perfis geológicos que contém tudo sobre a litologia conhecida e esperada e o controle estrutural,
2. Cálculo da gravidade teórica e dos efeitos magnéticos dos modelos geológicos,
3. Comparação destes efeitos com os mapas observados
4. Implementação dos filtros de campo magnético para remover efeitos regionais tais como ruídos de longos comprimentos de onda do terreno e sinais isostáticos, e melhorar os efeitos medidos da geologia local.
5. Implementação dos operadores de deconvolução de Euler para cálculos de profundidade magnética 2D e 3D e
6. Construção e modelo de inversão do campo gravitacional contido ao longo de número de perfis chave.

Regionalmente, a área pode ser dividida em duas distintas províncias de óleo: a sub-bacia Neiva e os *foothills* de Putumayo (norte da fronteira do Equador), atualmente separada pela cordilheira do leste, mas, provavelmente ligadas durante o período pré-Terciário. A bacia de Magdalena Superior ao sul de Neiva é ligada por falhas de empurrão no sentido de leste para oeste, que são expressões de dois eventos compressionais. Várias outras falhas de empurrão podem ser mapeadas dentro do embasamento, definindo altos topográficos que separam sub-bacias pouco espessas e profundas, muitas das quais cobertas por seqüências vulcânicas, mas agora reveladas através da interpretação de dados magnéticos e de gravidade. Os *foothills* de Putumayo representam uma área promissora para *plays*, coberta por finas seqüências ígneas.

Em geral espera-se que a anisotropia do embasamento exerça uma influência fundamental sobre a geometria de um sistema de falhas compressionais superimpostas. Do mesmo jeito que maiores falhas de empurrão nesta área podem se superpor ou coincidir com uma seqüência anterior de falhas normais. Dado o controle geológico suficiente é possível

distinguir elementos tectônicos finos e profundos, superpostas por estruturas do embasamento normalmente falhadas.

5.10.3 Exemplos

Neste estudo, várias províncias estruturais foram interpretadas a partir de mudanças nas características do campo magnético. As anomalias magnéticas de mais alta frequência são mapeadas no NW e NE (áreas A e C na figura 23). Estas áreas são comprimidas por elementos principalmente lineares e sublineares com mergulhos de NE a EW. A maioria destas anomalias de curto comprimento de onda tem correlação muito próxima com o terreno, sugerindo que o embasamento é na superfície ou próximo dela.

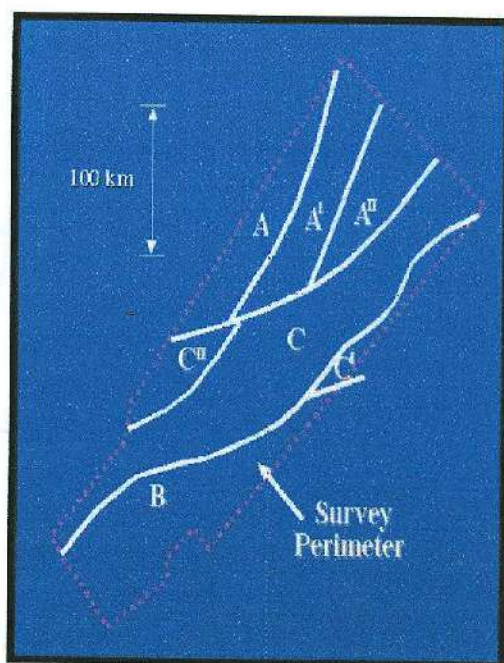


Figura 23 – *Províncias estruturais.* (CERON *et al.*, 2002)

O mapa de RTP (redução ao pólo) esclareceu a natureza e geometria da zona aérea central C onde vários discretos blocos do embasamento podem ser esperados. Anomalias ao longo desta zona são distintamente positivas na redução ao pólo do campo, são lineares, e

aparecem largamente de nordeste a sudoeste. As altas amplitudes destas anomalias (100 nT a 150 nT) em combinação com o aumento no comprimento de onda sugere que elas representam o embasamento magnético que é altamente falhado e mergulha em direção ao sul. E mais, um grande número de falhas de cruzamento podem ser observadas.

A área de embasamento profundo no sul é claramente evidente a partir das anomalias nesta região. Uma maior fronteira de falhas foi interpretada para separar o embasamento profundo na base de Putumayo a partir de um embasamento relativamente fino e tectonizado do oeste para o noroeste.

Uma bacia profunda e alongada é claramente identificada ao norte da área a partir da anomalia magnética linear negativa que é mapeada ao longo do eixo do vale. Esta característica é correlacionada com uma série de anomalias gravimétricas negativas evidentes no campo de gravidade residual. A bacia parece ser limitada por falhas em todos os lados (ver Figura 24).

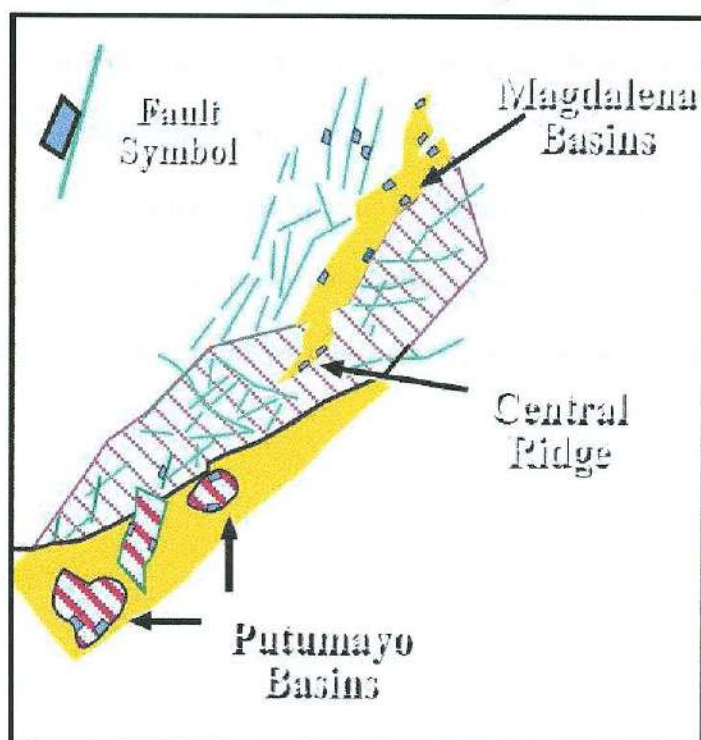


Figura 24 – *Resumo estrutural*. (CERON *et al.*, 2002)

No entanto, o campo ao longo da margem norte é fortemente negativo, a alta frequência associada ao alto aparecimento do relevo nesta área sugere que o embasamento é delgado porém comprido e de rochas relativamente menos magnéticas, opostamente à profundidade do embasamento magnético.

5.10.4 Conclusões do Levantamento

Os dados aéreos magnéticos e gravimétricos indicaram com sucesso um número de bacias sedimentares profundas e estruturas de falhas regionais. Bacias prospectivas foram identificadas e estão atualmente tendo exploração adicional. Uma série de bacias sedimentares, interconectadas, limitadas por falhas é evidenciada a partir dos dados magnéticos e de gravidade. Esta área também contém um grande número de falhas, que são claramente visíveis tanto nos dados gravimétricos quanto magnéticos. Estas falhas são paralelas ou mergulham próximas a muitas linhas sísmicas que foram feitas nesta área, e que são difíceis de inferir de dados puramente sísmicos.

A presente exploração desta região enfoca em várias áreas, muito estudadas com dados aéreos gravimétricos e magnéticos. Renovado interesse é demonstrado pela atual situação de abertura de blocos na região, espera-se que vários poços sejam perfurados num futuro próximo.

6 CONCLUSÃO

No estudo de caso apresentado, nós vimos um exemplo de aplicação de levantamentos magnéticos na Bacia Putumayo, que possui características deposicionais semelhantes à Bacia Oriente. Portanto, esperamos que os levantamentos magnéticos sejam aplicáveis também a esta bacia.

No capítulo quatro, sobre a geologia da bacia, vimos que a mesma apresenta sistema petrolífero e que vários campos de óleo já foram descobertos até hoje, sendo que alguns deles já estão em fase de produção. O mesmo ocorre com as Bacias Putumayo e de Marañon, que também são exploradas nos dias de hoje por diversas empresas de exploração geofísica.

A bacia Oriente é bastante explorada nos dias de hoje. Diversos levantamentos magnéticos já foram realizados nessa bacia (na maioria dos casos eles são utilizados em conjunto com outros métodos geofísicos, tal como os métodos gravimétricos), assim também como nas bacias de Putumayo e Marañon. Porém a maioria destes dados não é público, o que dificultou bastante a escrita do estudo de caso desta monografia.

Referências Bibliográficas

ALVARADO, G., BONILLA, G., DE ROJAS, G., DE ARROYO, R.Z., Analisis sedimentologico de la Zona Arenisca Napo "T" en la Cuenca del Napo, Simposio Bolivariano, exploracion petrolera en las Cuencas subandinas de Venezuela, Colombia, Ecuador y Peru: Asociacion Colombiana de Geologos y Geofisicos del Petroleo, Bogota. , 1982

ASPDEN, J.; MCCOURT, W.; BROOK, M. Geometrical control of subduction-related magmatism: the Mesozoic and Cenozoic plutonic history of Western Colombia. **J. Geol. Soc.**, London, v. 144, p. 893-905, 1987. ISSN 0016-7649.

ASPDEN, J.; LITHERLAND, M. The geology and Mesozoic collisional history of the Cordillera Real, Ecuador. **Tectonophysics**, v. 205, p. 187-204, 1992. ISSN 0040-1951

BABY, Patrice *et al.* Style and timing of deformation in the Oriente Basin of Ecuador. In: INTERNATIONAL SYMPOSIUM ON ANDEAN GEODYNAMICS, 4th, 1999, Gottingen, Germany. **Abstract...** Gottingen, Germany: 1999. p. 68-72.

BABY, Patrice; RIVADENEIRA, Marco; BARRAGÁN, Roberto (Coord.). **La Cuenca Oriente: geologia y petróleo**. 1. ed. Quito: Lima&Quito; Paris: Institut Français D'Études Andines (IFEA); Institut de Recherche pour le Développement (IRD); Quito: PETROECUADOR, 2004. v. 144.

BALKWILL, H. R. *et al.* Petroleum basins of South America—Northern part of Oriente Basin, Ecuador: reflection seismic expression of structures. In: TANKARD, A. J., SUAREZ SORUCO, R.; WELSINK, H. J. (Ed.). **Petroleum Basins of South America (AAPG Memoirs)**. Bath: Geological Society Publishing House, 1995. v. 62, p. 559-571.

BARRAGAN, Roberto; BABY, Patrice; DUCAN, Robert. Cretaceous alkaline intra-plate magmatism in the Ecuadorian Oriente Basin: Geochemical, geochronological and tectonic evidence. **Earth and Planetary Science Letters**, v. 236, p. 670-690, 2005.

BARRAGÁN, Robert *et al.* Estratigrafía secuencial del Cretacio de la Cuenca del Ecuador. In: BABY, Patrice; RIVADENEIRA, Marco; BARRAGÁN, Roberto. **La Cuenca Oriente: geologia y petróleo**. 1. ed. Quito: Lima&Quito; Institut Français d'Études Andines (IFEA); Institut de Recherche pour le Développement (IRD); PETROECUADOR, 2004. v. 144, p. 45-68.

BELOTTI, H. *et al.* Recognition of tectonic events in the conformation of structural traps in the Eastern Oriente Basin, Ecuador. In: AAPG ANNUAL CONVENTION, 2003, Salt Lake City, Utah. **Abstracts...** Salt Lake City, Utah: AAPG, 2003.

BURGOS, José David *et al.* Dynamic evolution of Oligocene – Neogene sedimentary series in a retroforeland basin setting: Oriente Basin, Ecuador. In: INTERNATIONAL SYMPOSIUM

ON ANDEAN GEODYNAMICS (ISAG), 6th, 2005, Barcelona. **Resumo...** Barcelona: Instituto de Pesquisa para o Desenvolvimento (IRD), 2005. p.127-130.

CANFIELD, R. W.; BONILLA, G.; ROBBINS, R. K. Sacha oil field of Ecuadorian Oriente. **AAPG Bulletin**, v. 66, n. 8, p. 1076-1090, 1982.

CAVALCANTI, Anselmo. Revisão Tectono/Estratigráfica da Bacia do Oriente e sua evolução geodinâmica global. 1995. 95 f. Plano de Dissertação (Mestrado em Geologia) – Universidade Federal de Ouro Preto, Ouro Preto/MG, 1995.

CERON, J. F.; BAIN, J. E. Airborne gravity and magnetic interpretation of the Putumayo and upper Magdalena Valley, Colombia. In: EAGE 64th CONFERENCE & EXHIBITION, 2002, Florence, Italy. **Resumos...** Florence: EAGE, 2002.

CHRISTOPHOUL, F.; BABY, P.; DAVILA, C. Stratigraphic responses to a major tectonic event in a foreland basin: the Ecuadorian Oriente Basin from Eocene to Oligocene times. **Tectonophysics**, v. 345, p. 281-298, 2002. ISSN 0040-1951.

DIAZ, Marlon *et al.* El Pre-Aptense en la Cuenca Oriente Ecuatoriana. In: BABY, Patrice; RIVADENEIRA, Marco; BARRAGÁN, Roberto (Coord.). **La Cuenca Oriente: geología y petróleo**. 1. ed. Quito: Lima&Quito; Paris: Institut Français D'Études Andines (IFEA); Institut de Recherche pour le Développement (IRD); Quito: PETROECUADOR, 2004. v. 144, p. 23-44.

EMERY, D.; MYERS, R.J.. **Sequence Stratigraphy**. Blackwell Science; 1997; 297p.

HIGLEY, D. K. **The Putumayo-Oriente-Maranon province of Colombia, Ecuador, and Peru-Mesozoic-Cenozoic and Paleozoic petroleum systems**. Denver: Central Region, 2000.

HUNTER, V. A.; PLINT, A. G.; CONIGLIO, M. A sequence stratigraphic model of a mixed clastic-carbonate shelf system: the Cretaceous Napo Formation, Oriente Basin, Ecuador. In: CSEG CONFERENCE. Geocanada 2000: the millennium geoscience summit. **Abstracts...** Ontario, Canadá: SEG, 2000. Disponível em: <http://www.cseg.ca>. Acesso em: 02 maio 2007.

JACQUES, John M. A tectonostratigraphic synthesis of the Sub-Andean basins: implications for the geotectonic segmentation of the Andean Belt, **Journal of the Geological Society**, v.160, n.5, p. 687-701, Sept. 2003.

JAILLARD, E. *et al.* Tectonic evolution of the Andes of Ecuador, Peru, Bolivia and Northernmost Chile. In: CORDANI, U. G. *et al.* (Ed.). **Tectonic evolution of South America**. Rio de Janeiro: 2000. p. 481-559. 31st International Geological Congress.

LINDSAY, R. O.; BOCANEGRA, D. Sand thickness prediction from band-limited seismic attributes using neural networks: Oriente Basin, Ecuador. In: SEG. **SEG technical program expanded abstracts**. Salt Lake City, Utah: SEG, 2002. p. 2451-2454.

MACELLARI, C.E.; DE VRIES, T.J., **Late Cretaceous upwelling and anoxic sedimentation in northwestern South America: Palaeogeography, Palaeoclimatology, Palaeoecology**, v. 59, 1987 p. 279-292.

MATHALONE, J. M. P.; MONTOYA R. M. Petroleum geology of the sub-Andean basins of Peru. In: TANKARD, A. J.; SUÁREZ, R.; WELSINK, H. J. **Petroleum basins of South America**. AAPG Memoir 62, 1995. v. 423, p. 423-444.

MIRANDA, J. M. A. Introdução ao Geomagnetismo. Licenciatura em Ciências Geofísicas – Centro de ciências da Universidade de Lisboa. Universidade de Lisboa.

NABIGHIAN, M. N.; GRAUCH, V. J. S.; HANSEN, R. O.; LAFEHR, T. R.; LI, T.; PEIRCE, J. W.; PHILLIPS, J. D.; RUDER, M. E. The historical development of the magnetic method in exploration. **SEG**, v.70, n.6, p.33ND-61ND, novembro.2005. ISSN

NOVAK, M. A. Introdução ao Magnetismo. In: II ESCOLA BRASILEIRA DE MAGNETISMO. Rio de Janeiro, CBPF, 1999.

PARDO-CASAS, Federico; MOLNAR, Peter. Relative motion of the Nazca (Farallon) and South American Plates since Late Cretaceous time. **Tectonics**, v. 6, n. 3, p. 233-248, 1987.

PETROBRAS. 2007. Aplicação dos métodos potenciais na interpretação exploratória. Curso de Formação de Geofísicos jr. da Petrobras. Janeiro.2007. Rio de Janeiro: Universidade Petrobras.

RIVADENEIRA, M. V. Petroleum geology of the eastern edge of the Oriente Basin. In: IRD. **Géodynamique andine: résumés étendus. Andean geodynamics: extended abstracts. Geodinámica andina: resúmenes ampliados**. Paris Toulouse: Institut de Recherche pour le Développement (IRD) – Université Paul Sabatier, 2003. p. 525-528.

TELFORD, W. M.; GELDART, L. P.; SHERIFF, R. E. **Applied Geophysics**. 02.ed. Cambridge, Cambridge University Press, 1990. 770p. ISBN 0-521-33938-3

TSCHOPP, H. J. Oil exploration in the Orient of Ecuador. **AAPG Bulletin**, v. 37, n.10, p. 2303-2347, Oct. 1953.

WHITE, H. J. *et al.* Reservoir characterization of the Hollin and Napo formations, Western Oriente Basin, Ecuador. In: TANKARD, A. J.; SUÁREZ, R.; WELSINK, H. J. **Petroleum basins of South America**. AAPG Memoir 62, 1995. p.573-596. ISBN 0-89181-341-1

WHITE, Howard J. *et al.* Sequence stratigraphy of the Cretaceous Ecuadorian Oriente Basin: tectonic and sedimentary evidences of an early foreland deformation. In: IRD. **Géodynamique andine: résumés étendus. Andean geodynamics: extended abstracts. Geodinámica andina: resúmenes ampliados**. Paris Toulouse: Institut de Recherche pour le Développement (IRD) – Université Paul Sabatier, 2003. p.701-704.