



UFRJ

**Leonardo de Magalhães Alvim**

**BACIA ORIENTE**  
**Conhecimento Geológico, Petrolífero e Geofísica Aplicada**  
**(Gravimetria)**

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 Ferrucio da Rocha

Leonardo Fonseca Borghi de Almeida

Rio de Janeiro

Julho de 2007

M  
GL  
N415B

LEONARDO, de Magalhães Alvim

**Bacia Oriente:** Conhecimento Geológico, Petrolífero e Geofísica Aplicada (Gravimetria) / Leonardo de Magalhães Alvim - - Rio de Janeiro: UFRJ / IGeo, 2007.

122 p. : 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 Ferrucio da Rocha, Leonardo Fonseca Borghi de Almeida

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

Leonardo de Magalhães Alvim

BACIA ORIENTE

Conhecimento Geológico, Petrolífero e Geofísica Aplicada (Gravimetria)

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 Ferrucio da Rocha  
Leonardo Fonseca Borghi de Almeida

Aprovada em: 31.07.2007

Por:

---

Paula Lúcia Ferrucio da Rocha (UFRJ)

---

Leonardo Fonseca Borghi de Almeida(UFRJ)

UFRJ  
Rio de Janeiro  
2007

Dedico esta Monografia aos meus pais, que sempre foram um grande suporte à minha vida.

## **Agradecimentos**

Agradeço à Petrobras e à Universidade Federal do Rio de Janeiro por permitirem que eu adquirisse uma base de conhecimentos suficientes para a conclusão deste trabalho e por trazerem um grande crescimento pessoal e profissional em minha vida.

Agradeço a Júlio César Soares de Oliveira Lyrio por me orientar na aprendizagem de assuntos bastante importantes para o desenvolver deste trabalho e a Josenildo Vicente Firmino por me repassar informações de extrema ajuda.

## Resumo

DE MAGALHÃES ALVIM, Leonardo. **Bacia Oriente**: Conhecimento Geológico, Petrolífero e Geofísica Aplicada (Gravimetria). 2007. 122 p. 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.

Este presente trabalho tem como foco a Bacia do Oriente, uma bacia andina que está incluída no sistema de bacias foreland Putumayo-Oriente-Marañon que cobre uma área próxima de 320.000  $km^2$ . Primeiramente, é desenvolvida uma exposição detalhada de informações relacionadas ao contexto geológico desta bacia, inclusive do ponto de vista petrolífero. Em seguida, é feita uma introdução à teoria básica do método geofísico de Gravimetria. A introdução à teoria de Gravimetria visa fornecer bases ao leitor para a compreensão da última abordagem deste trabalho: uma aplicação prática deste método geofísico na Bacia Marañon, aplicação esta que é voltada para o ramo da indústria do petróleo.

Palavras-chave: aerogravimetria, Bacia Oriente, geofísica aplicada.

### **Abstract**

DE MAGALHÃES ALVIM, Leonardo. [**Oriente Basin: Geological, Petroliferous Knowledge and Applied Geophysics (Gravimetry)** ]. 2007. 122p. 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.

This present work is focused on the Oriente Basin, an andine basin that is included on the foreland basin systems Putumayo-Oriente-Marañon that covers an area of about 320.000 Km<sup>2</sup>. Firstly, is developed a detailed exposure of information related to the geological context of this basin, including of the petroliferous point of view. Then, an introduction to the base theory of the geophysical method of Gravimetry is done. The introduction to the Gravimetry theory intends to provide resources to the reader for a comprehension of the last issue of this work: a direct application of this geophysical method on the Marañon Basin and that is focused to the oil industry business.

Key-words: aerogravimetry, applied geophysics, Oriente Basin.

*“O único lugar onde o sucesso vem antes do trabalho é no dicionário”.*

Albert Einstein

## LISTA DE FIGURAS

Figura 1 – Localização da Bacia Oriente.....	1
Figura 2 – Posicionamento geográfico e principais contextos geológicos da Bacia Oriente....	9
Figura 3 – Estruturas em meio-gráben do Sistema Capirón-Tiputini.....	11
Figura 4 – Zonas de transferência.....	12
Figura 5 - Tectônica extensional da parte nordeste da Bacia Oriente Principais feições estruturais e zonas de transferência (superior) e seções geológicas (inferior) .....	13
Figura 6 – Seções sísmicas do Meio-Gráben de Obe. Região sul (superior), central (centro) e norte (inferior). .....	14
Figura 7 – Tectônica compressional da parte nordeste da Bacia do Oriente. Principais feições estruturais e dobras anticlinais associadas .....	15
Figura 8 – Perfis regionais das principais estruturas no sistema Capirón-Tiputini.....	16
Figura 9 – Estrutura de Minta: falha transcorrente dextral .....	17
Figura 10 – Complexo Obe-Pimare-Yuturi: falha transcorrente sinistral .....	18
Figura 11 – Feições distensionais e compressionais na estrutura ITT .....	19
Figura 12 – Seção geológica da Bacia Oriente .....	21
Figura 13 – Diagrama estratigráfico da Bacia Oriente .....	21
Figura 14 – Formações, membros e ciclos sedimentares do Cretáceo da Bacia Oriente, e suas relações com a curva eustática. ....	23
Figura 15 – Seqüências deposicionais da Formação Hollin.....	24
Figura 16 – Estratigrafia da Formação Napo.....	26
Figura 17 – Estratigrafia do período Paleoceno-Quaternário .....	28
Figura 18 – 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 Fonte: HIGLEY (2000).....	32
Figura 19 – Mapa e seção estrutural da Bacia Oriente com seus três corredores estruturais-petrolíferos .....	38
Figura 20 – Atração entre dois corpos, sendo $r$ a distância entre os centros de massa destes. ....	46
Figura 21 –Distância $r$ , em relação a um ponto $P$ , de um elemento de massa $dm$ arbitrário com volume $dV$ .....	51
Figura 22 – Os eixos $x$ e $y$ estão paralelos ao plano do terreno e o eixo $z$ perpendicular ao plano .....	53
Figura 23 – Corpo de massa $m$ em uma trajetória circular .....	57
Figura 24 – Aceleração centrípeta em uma seção circular arbitrária.....	58
Figura 25 – Comparação entre os raios equatorial e polar da Terra.....	60
Figura 26 – Aceleração resultante em um ponto $P$ arbitrário na superfície da Terra.....	61
Figura 27 – Contraste entre o esferóide e o geóide.....	63
Figura 28 – Deslocamento das estações $A, B$ e $C$ ao DATUM.....	69
Figura 29 – Distância em relação ao centro da Terra para os pontos $P$ e $Q$ .....	70
Figura 30 – As situações 1 e 2 são análogas e $F_M = F_{-M}$ , onde $F_M$ é a força gravitacional gerada pela montanha de massa $M$ da situação 2 e $F_{-M}$ é o quanto se modifica a força gravitacional resultante no ponto $Q$ devido à depressão da situação 1. ....	73
Figura 31 – Estação Subterrânea .....	75
Figura 32 – Isostasia, onde $\rho$ é dado em $g/cm^3$ .....	80
Figura 33 – Mapa Bouguer.....	81

Figura 34 – Na figura, a área do levantamento está destacada no pequeno retângulo amarelo, no centro superior da figura. ....	83
Figura 35 – Separação geológica entre o topo do embasamento e a base do Cretáceo .....	84
Figura 36 – Modelo Geológico do Topo do embasamento cristalino .....	89
Figura 37 – Modelo Geológico da base do Cretáceo .....	90
Figura 38 – Mapa topográfico da área de levantamento .....	91
Figura 39 – Mapa Bouguer, com DATUM no nível do mar .....	92
Figura 40 – Mapa Regional Controlado do topo do embasamento .....	93
Figura 41 – Mapa Regional Controlado da base do Cretáceo.....	94
Figura 42 – Mapa Residual Controlado do topo do embasamento .....	95
Figura 43 – Mapa Residual Controlado da base do Cretáceo .....	96
Figura 44 – Novo modelo geológico para o topo do embasamento, obtido após o uso da Inversão 3D .....	97
Figura 45 – Novo modelo geológico para a base do Cretáceo, obtido após o uso da Inversão 3D .....	98
Figura 46 – Mapa de mesmas espessuras (isópacas) das camadas que situam entre o topo do embasamento e a base do Cretáceo, elaborado a partir da diferença de altitudes em relação aos modelos de Inversão 3D para o topo do embasamento e a base do Cretáceo .....	99
Figura 47 – Interpretação estrutural do embasamento, elaborada por Dr. Victor Graterol. Na figura, aparecem os altos estruturais, baixos estruturais, contornos estruturais e falhas .....	100
Figura 48 – Interpretação estrutural da base do cretáceo elaborada por Dr. Victor Graterol. Na figura, aparecem os altos estruturais, baixos estruturais, contornos estruturais e falhas. ....	101
Figura 49 – Visualização de um dos perfis finais do modelo geológico, já modificado após a inversão 3D para ajuste final entre os dados calculados pelo computador e os dados observados .....	102

## LISTA DE QUADROS

Quadro 1 – <i>Tabela de densidade de diversos materiais</i> .....	54
-------------------------------------------------------------------	----

**LISTA DE TABELAS**

Tabela 1 – Na segunda e terceira colunas, tem-se as coordenadas dos pontos de controle na projeção cartográfica de Universal Transverse Mercator .....	85
--------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------	----

## SUMÁRIO

AGRADECIMENTOS .....	VI
RESUMO.....	VII
ABSTRACT.....	VI
LISTA DE FIGURAS.....	IX
LISTA DE QUADROS.....	XI
LISTA DE TABELAS.....	XII
SUMÁRIO.....	XIII
<b>1 INTRODUÇÃO .....</b>	<b>1</b>
<b>2 OBJETIVO .....</b>	<b>3</b>
<b>3 MÉTODO.....</b>	<b>4</b>
<b>4 CONTEXTO GEOLÓGICO DA BACIA ORIENTE.....</b>	<b>5</b>
4.1 CONTEXTO GERAL.....	5
4.2 CONTEXTO GEOTECTÔNICO .....	7
4.2.1 <i>Tectônica da bacias</i> .....	7
4.3 GEOLOGIA ESTRUTURAL.....	9
4.3.1 <i>Tectônica Extensional</i> .....	12
4.3.2 <i>Tectônica Compressional</i> .....	15
4.3.3 <i>Trapas Estruturais</i> .....	18
4.4 ESTRATIGRAFIA .....	20
4.4.1 <i>Paleozóico</i> .....	20
4.4.2 <i>Jurássico</i> .....	22
4.4.3 <i>Cretáceo</i> .....	22
4.4.4 <i>Paleoceno-Quaternário</i> .....	27
4.5 SISTEMAS PETROLÍFEROS.....	29
4.5.1 <i>Rocha geradora</i> .....	29
4.5.2 <i>Migração</i> .....	31
4.5.3 <i>Reservatório</i> .....	33
4.5.4 <i>CARACTERIZAÇÃO DOS RESERVATÓRIOS PRINCIPAIS DAS TRÊS UNIDADES TECTÔNICAS</i> .....	34
4.5.4.1 O “play” ocidental (sistema subandino) .....	34
4.5.4.2 O “play” central (corredor sacha-shushufindi) .....	35
4.5.4.3 O “play” oriental (sistema Capiirón-Tiputini) .....	37
4.5.5 <i>TRAPAS OU ARMADILHAS</i> .....	39
4.5.5.1 <i>Trapas do “play” ocidental (sistema subandino)</i> .....	39
4.5.5.2 <i>Trapas do “play” central (corredor Sacha-Shushufindi)</i> .....	39
4.5.5.3 <i>Trapas do “play” Oriental (sistema Capiirón-Tiputini)</i> .....	40
4.5.6 <i>ROCHAS SELANTES</i> .....	41

<b>5 MÉTODO GEOFÍSICO: GRAVIMETRIA</b> .....	<b>42</b>
5.1 INTRODUÇÃO .....	42
5.1.1 HISTÓRIA DA GRAVIDADE E DO INÍCIO DE SUA EXPLORAÇÃO .....	42
5.1.2 INFORMAÇÕES GERAIS SOBRE O MÉTODO .....	44
5.1.3 INTRODUÇÃO AO ESTUDO DE CASO .....	45
5.2 GRAVIDADE PRINCÍPIOS FÍSICOS E EQUAÇÕES RELACIONADAS .....	45
5.2.1 Isaac Newton e a Lei da Gravitação Universal .....	45
5.2.2 A aceleração gravitacional terrestre .....	47
5.2.3 O potencial gravitacional de uma partícula .....	48
5.3 DISTRIBUIÇÕES DE MASSA: POTENCIAL GRAVITACIONAL E ACELERAÇÕES .....	50
5.3.1 O POTENCIAL GRAVITACIONAL DE UMA DISTRIBUIÇÃO DE MASSA .....	50
5.3.1.1 Cálculo do potencial gravitacional .....	50
5.3.1.2 Superfícies equipotenciais .....	52
5.3.2 ACELERAÇÕES .....	52
5.3.2.1 A aceleração gravitacional devido a uma distribuição de massa .....	52
5.3.2.2 A aceleração centrípeta .....	56
5.3.2.3 A aceleração centrífuga .....	58
5.4 O ESFERÓIDE E O GEÓIDE .....	61
5.4.1 O esferóide .....	61
5.4.2 O geóide .....	62
5.5 MEDIÇÕES RELACIONADAS À ACELERAÇÃO RESULTANTE $G$ .....	63
5.5.1 Introdução .....	63
5.5.2 As estações de medida de $g$ .....	64
5.5.3 Medidas absolutas .....	65
5.5.4 Medidas relativas .....	67
5.6 CORREÇÕES NOS VALORES OBTIDOS PARA $G$ .....	68
5.6.1 Introdução .....	68
5.6.2 O DATUM .....	69
5.6.3 CORREÇÕES .....	69
5.6.3.1 Correção de altitude ou free-air .....	69
5.6.3.2 Correção de latitude .....	71
5.6.3.3 Correções de terreno .....	72
5.6.3.4 A correção Bouguer .....	74
5.6.3.5 Correção do Efeito Eötvös .....	76
5.6.3.6 Correção de Maré .....	77
5.6.3.7 Correções de Deriva .....	78
5.6.3.8 Correção isostática .....	78
5.8 ANOMALIAS GRAVIMÉTRICAS .....	80
5.8.1 O Mapa Bouguer .....	80
5.9 INTERPRETAÇÃO DOS DADOS GRAVIMÉTRICOS .....	82
5.9.1 Método direto .....	82
5.9.2 Método inverso .....	82
5.10 ESTUDO DE CASO .....	83
5.10.1 Introdução .....	83
5.10.2 Objetivos .....	85
5.10.3 Interpretação dos dados gravimétricos .....	86
5.10.4 Conclusões .....	88
<b>6 CONCLUSÃO</b> .....	<b>103</b>

**REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS ..... 104**

## 1 INTRODUÇÃO

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 Putomayo na Colômbia. Separa-se, ainda, da Bacia Amazonas, a Leste.



Figura 1- Localização da Bacia Oriente  
Fonte: ESTUPINÁN *et. al* (2006)

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 Putomayo-Oriente-Marañon, um sistema de bacias *foreland* que cobre aproximadamente 320.000  $km^2$  (MATHALONE & MONTOYA, 1995).

A Bacia Oriente é uma bacia prolífica no que diz respeito a petróleo. 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 (RIVADENEIRA & BABY, 2004).

Os principais reservatórios produtivos da bacia são Hollín do Aptiano -Albiano Médio, do Albiano Superior, do Cenomaniano Superior e do Campaniano.

Apesar da Bacia Oriente ser prolífica, os trabalhos aplicados a esta bacia para exploração de petróleo e que são baseados em Gravimetria podem ser escassos ou, mais provavelmente, não são divulgados por questões de interesses econômicos empresariais. Ainda assim, esse trabalho, além de expor conhecimentos geológicos e petrolíferos acerca da Bacia Oriente, explica de forma razoavelmente aprofundada toda a teoria do método geofísico de gravimetria. Em seguida é elaborado um estudo de caso de um relatório baseado em um levantamento aerogravimétrico na Bacia Marañon, nos limites desta com a Bacia Oriente.

## 2 OBJETIVO

Conforme já fora comentado e será comentado mais detalhadamente no capítulo 4, a Bacia Oriente é uma bacia prolífica em termos de exploração petrolífera. A Bacia Oriente possui muitas falhas em seu embasamento pré-cambriano, devido a episódios de tectônica compressional. E possui pelo menos uma formação, Napo, do Período Cretáceo, que é extremamente rica na geração de óleo na Bacia Oriente.

Entretanto, já se mencionou que parece quase não existir trabalhos na Bacia Oriente de gravimetria aplicada, voltados para a indústria petrolífera, disponíveis publicamente. Baseando-se em dados obtidos por levantamento aerogravimétrico na Bacia Marañon, no Peru, nos limites da transição entre essa bacia e a Bacia Oriente, no Equador, bem como em informações de poços e de dados de sísmica 2D da Bacia Oriente em uma região também próxima dos limites dessas duas bacias e, ainda, em sua experiência profissional, Dr. Victor Graterol, professor da Universidade Simon Bolivar, Venezuela, elaborou um relatório com sua interpretação geológica de uma região de interesse petrolífero na Bacia Oriente.

Este presente trabalho aborda aspectos geológicos e petrolíferos da Bacia Oriente e, além disso, aborda também toda a base teórica necessária para a compreensão do método geofísico de gravimetria. O último passo desse trabalho é elaborar um estudo do relatório elaborado por Victor Graterol.

Resumindo, pode se dizer que esse trabalho visa analisar, interpretar e descrever, em alguns momentos de forma objetiva e em outros de forma subjetiva, o relatório elaborado por Victor Graterol. Os aspectos geológicos e petrolíferos da Bacia Oriente, bem como a base teórica do método geofísico de gravimetria contidos nesse trabalho servem como suporte e consulta em relação à elaboração do estudo do relatório de Victor Graterol.

### 3 MÉTODO

No desenvolvimento da base teórica deste trabalho muitas informações foram extraídas de algumas fontes seletas. LOWRIE (1997) é uma fonte que abrange de forma ampla os fenômenos relacionados a efeitos gravitacionais. Por ser um livro tutorial e em muitas situações ter um enfoque mais qualitativo, é bom para um primeiro contato com assuntos relacionados a Gravimetria. Entretanto, este livro tem uma base matemática que também não deixa a desejar. Já TELFORD *et al.*(1990) é um livro com enfoque mais quantitativo. É bom para se extrair dados numéricos e tabelas, bem como para se ter uma compreensão matemática mais aprofundada. BUONORA(2006) e FERNANDES (1984) são fontes em que a teoria gravimétrica está explicada de forma bastante sucinta. Estas são fontes boas para se extrair informações a serem utilizadas para uma explicação objetiva. THORNTON (1995) é importante por dar um suporte no tratamento da física envolvida em gravimetria.

Uma aplicação prática do método geofísico de gravimetria fora unicamente baseada em um relatório de um levantamento aerogravimétrico interpretado por **Victor Graterol** para uma empresa petrolífera. Portanto, este relatório fora de suma importância para ser possível contextualizar o método geofísico de Gravimetria com suas aplicações no ramo da indústria do petróleo.

Enfim, seletas fontes foram suficientes para abranger todos os tópicos propostos para este presente trabalho.

## 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 sub-andinas 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 soerguimento 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-Ecuador.

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 dois domínios: o "foothill" sub-andino, que constitui a borda ocidental da Bacia Oriente, e a planície amazônica, ou Bacia Oriente propriamente dita, que é toda a região plana que se estende ao Oriente partindo da cordilheira. A área costeira possui largura entre 50 a 180 *Km* e altura máxima de 300m, formado por rochas alóctones de idade cretácea, sob rochas continentais terciárias e sedimentos paleógenos clásticos e carbonáticos. E esta seqüência 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.

Conforme já comentado no primeiro capítulo deste texto, a Bacia Oriente se localiza na parte Noroeste (NW) da Placa Sul-Americana. Esta bacia está limitada geograficamente em continuidade ao Norte pela bacia de Putumayo e ao Sul pela Bacia Marañon . Separa-se ainda pela Bacia Amazonas à Leste.

Interações tectônicas entre as atuais Placas Litosféricas de Nazca e Sul-americanas descrevem a área em questão.

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 km<sup>2</sup> (MATHALONE & MONTOYA, 1995).

Estratigraficamente e estruturalmente, a bacia do Oriente preserva uma história 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 bacias

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 2). Ela preserva um preenchimento sedimentar, variando na idade do Paleozóico ao Quaternário, sobre um embasamento cratônico pré-cambriano. A coluna estratigráfica (Figura 13) 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 megassequência 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 Masticiano-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,



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-Sushunfindi 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 (Figura 3).

A evolução dos falhamentos formadores destes grábens criou zonas de transferências, sendo que há três geometrias principais descritas (BELOTTI 2003; Figura 4).

- *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*

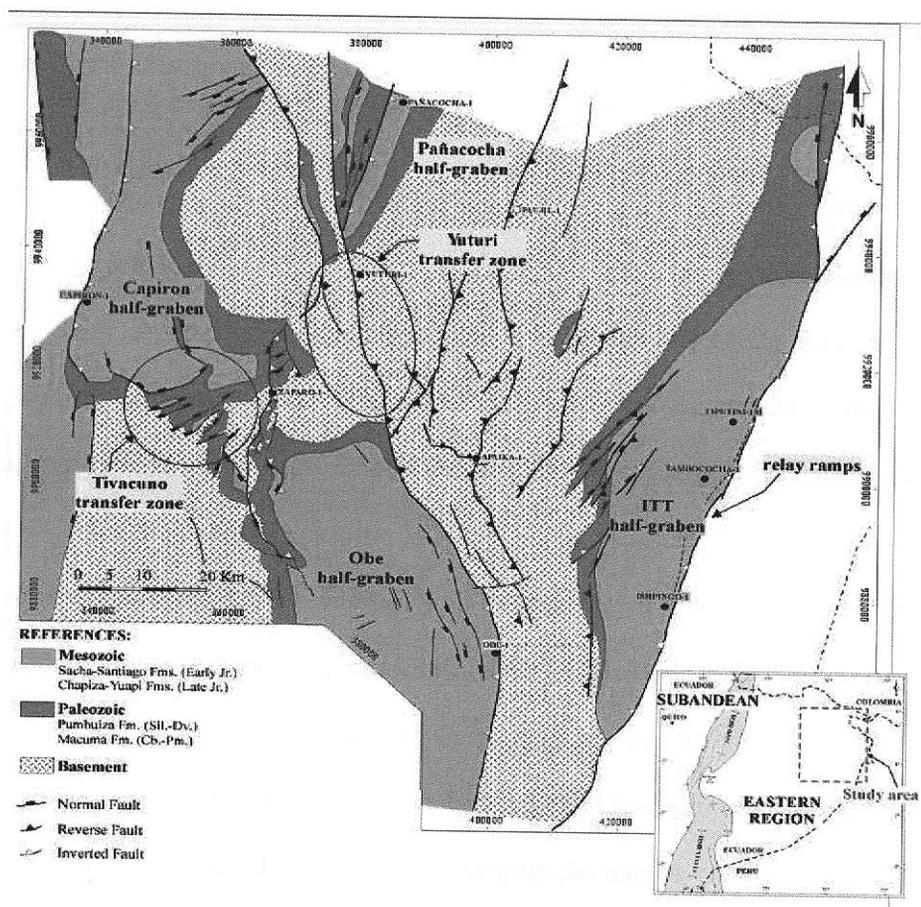


Figura 3 – Estruturas em meio-gráben do Sistema Capirón-Tiputini  
Fonte: BELOTTI *et al.*, (2003).

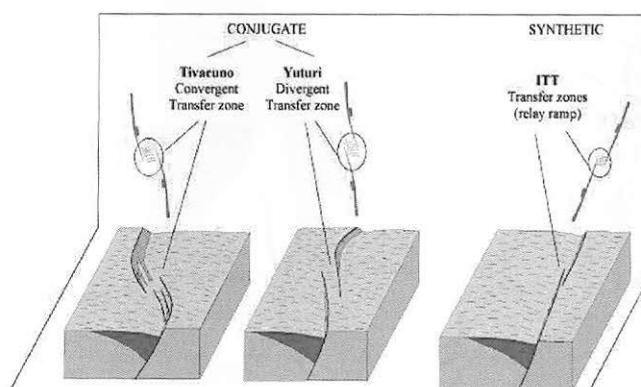
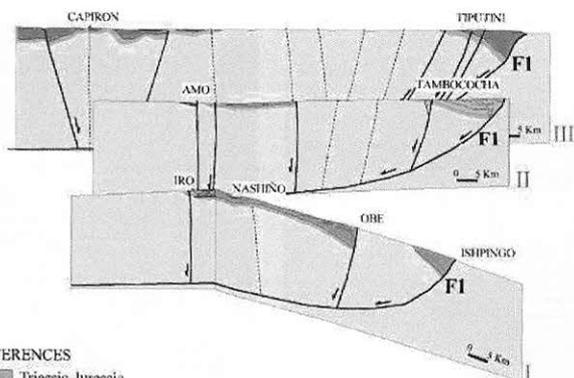
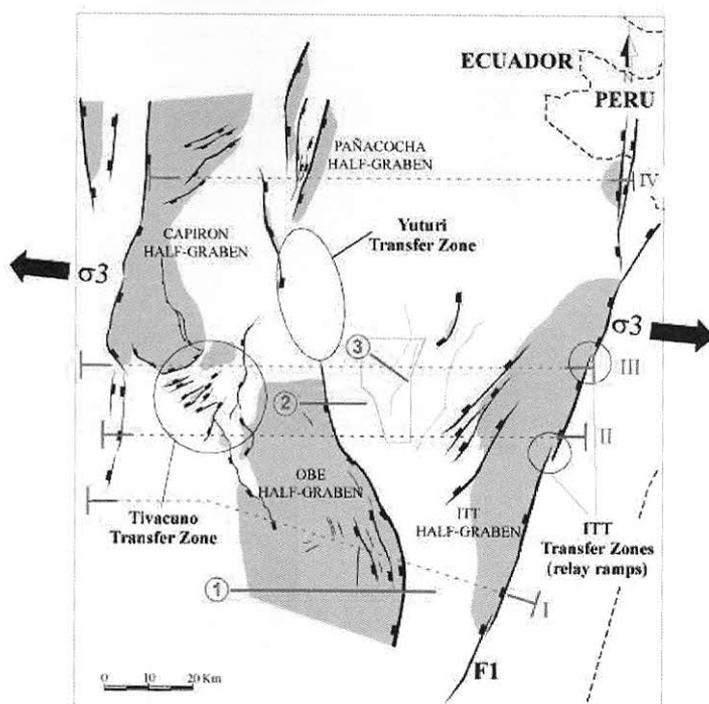


Figura 4 – Zonas de transferência  
Fonte: BELOTTI *et al.*, (2003).

#### 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  $\sigma_3$  atuando na direção Oeste-Noroeste (Figura 5). 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 5), observa-se ao Sul (Figura 6, superior), mergulhos da fábrica do embasamento subparalelos à falha principal distensional de mergulho Oeste, enquanto que ao Norte (Figura 6, 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.



REFERENCES  
 ■ Triassic-Jurassic  
 ■ Paleozoic  
 ■ Basement

Figura 5 - Tectónica extensional da parte nordeste da Bacia Oriente Principais feições estruturais e zonas de transferência (superior) e seções geológicas (inferior)  
 Fonte: BELOTTI et al. (2003).

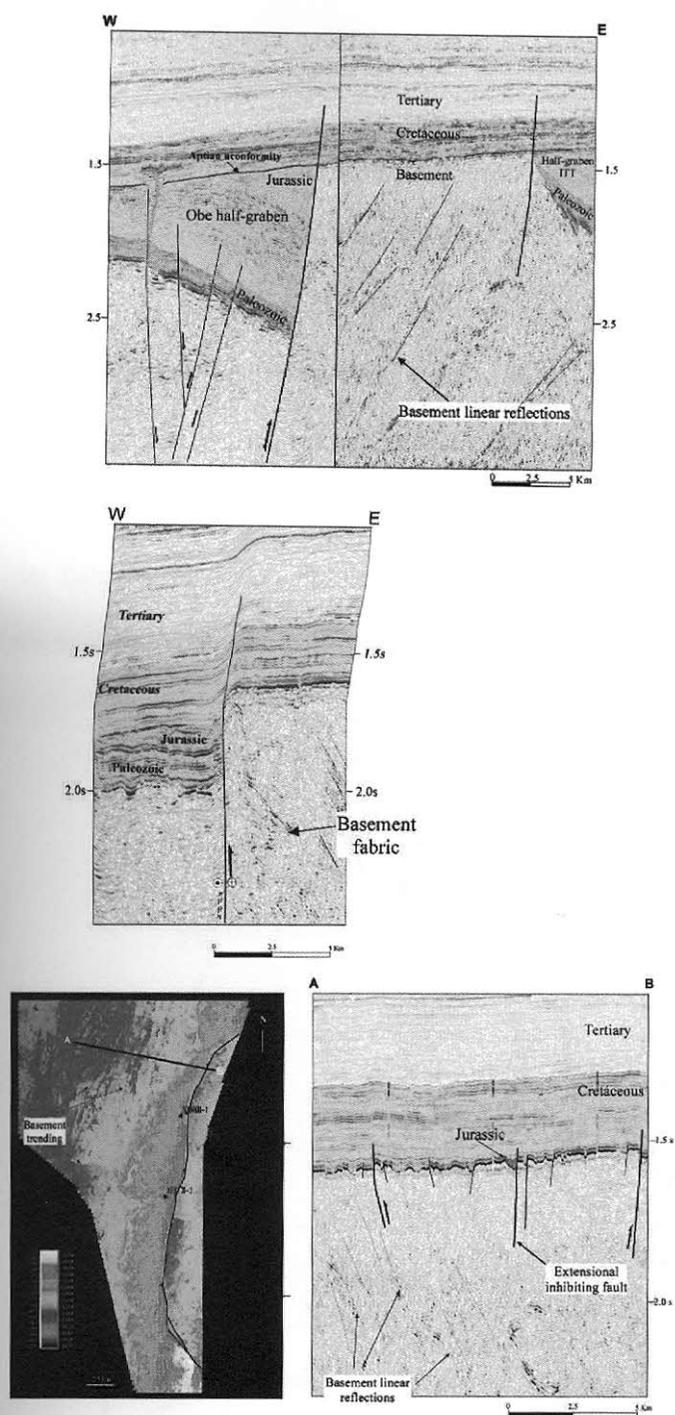


Figura 6 – Seções sísmicas do Meio-Graben de Obe. Região sul (superior), central (centro) e norte (inferior).  
 Fonte: BELOTTI et al. (2003).

#### 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 obducção 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 7 e nos modelos geológicos I, II, III e IV (Figura 8).

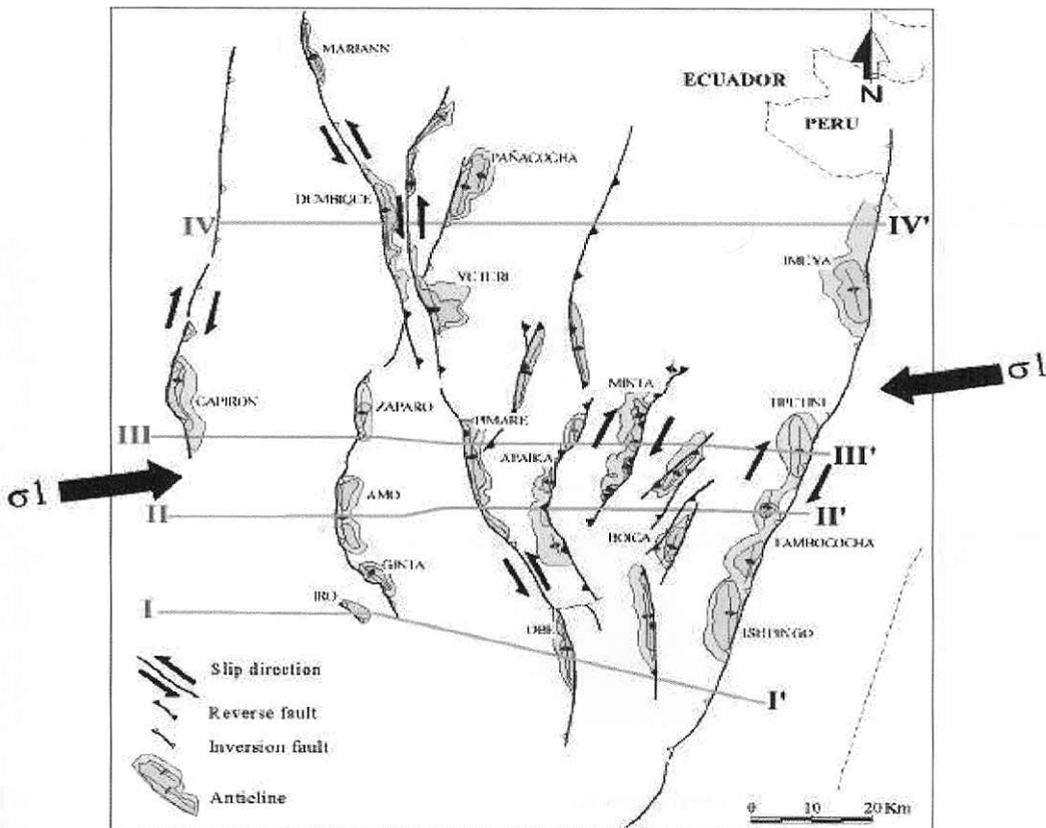


Figura 7 – Tectônica compressional da parte nordeste da Bacia do Oriente. Principais feições estruturais e dobramentos anticlinais associadas

Fonte: BELOTTI *et al.* (2003).

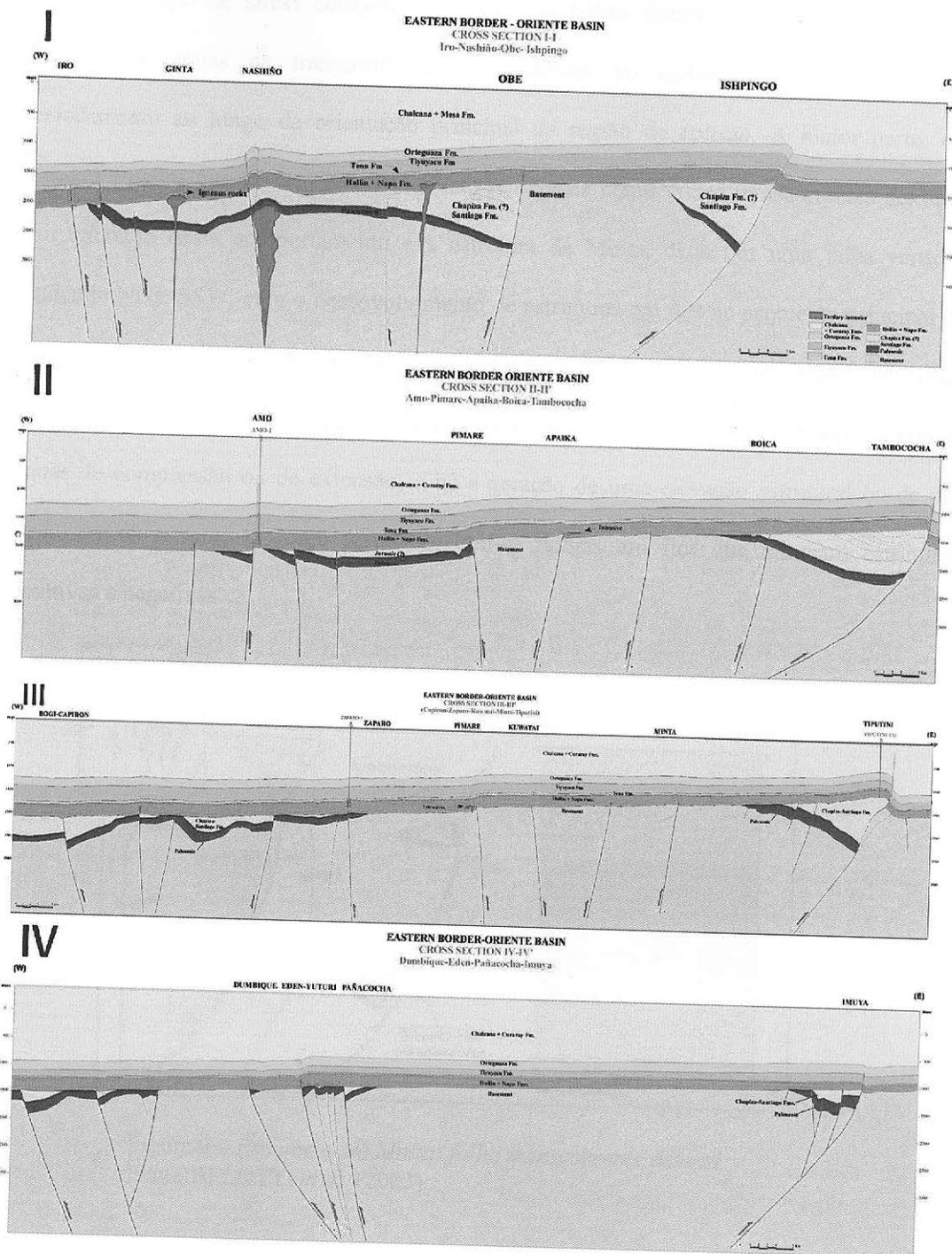


Figura 8 – Perfis regionais das principais estruturas no sistema Capirón-Tiputini  
 Fonte: BELOTTI et al. (2003).

No campo de stress compressional ( $\sigma_1$ ), 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 9 e Figura 8 – 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.

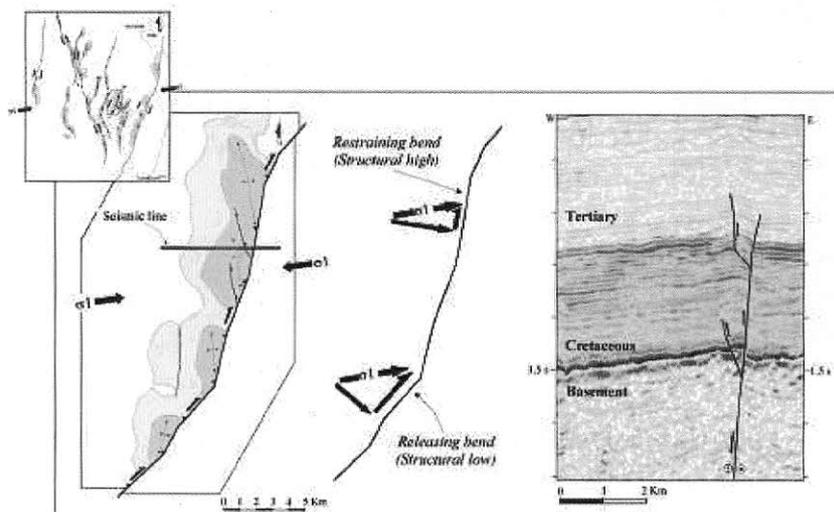


Figura 9 – Estrutura de Minta: falha transcorrente dextral  
Fonte:BELOTTI *et al.* (2003).

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

10). Nesta área, o deslocamento no *hangingwall* desta falha gera o anticlinal da falha de Obe ao Sul (Figura 10 e Figura 8 – seções 1 e 4), e no *footwall*, gera os anticlinais de falha de Pimare e de Yuturi para o Norte (Figura 10 e Figura 8 – seções 3 e 4).

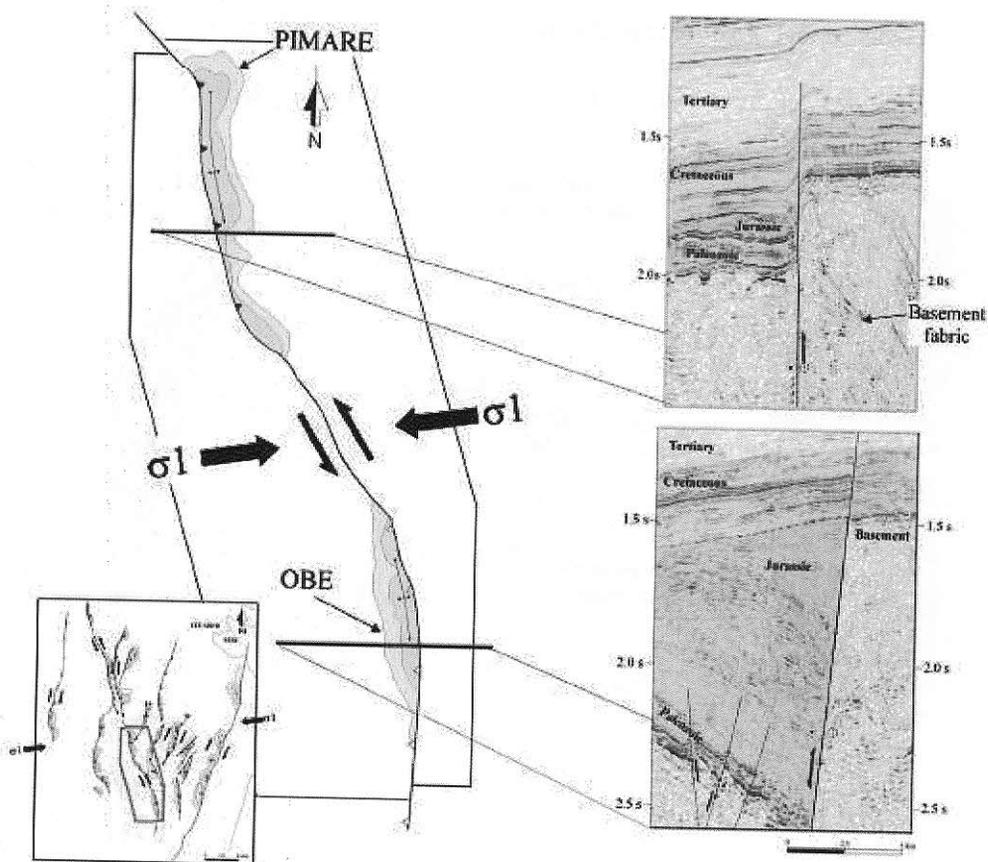


Figura 10 – Complexo Obe-Pimare-Yuturi: falha transcorrente sinistral  
 Fonte: Belotti *et al.*, 2003.

#### 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 trapeamentos 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).

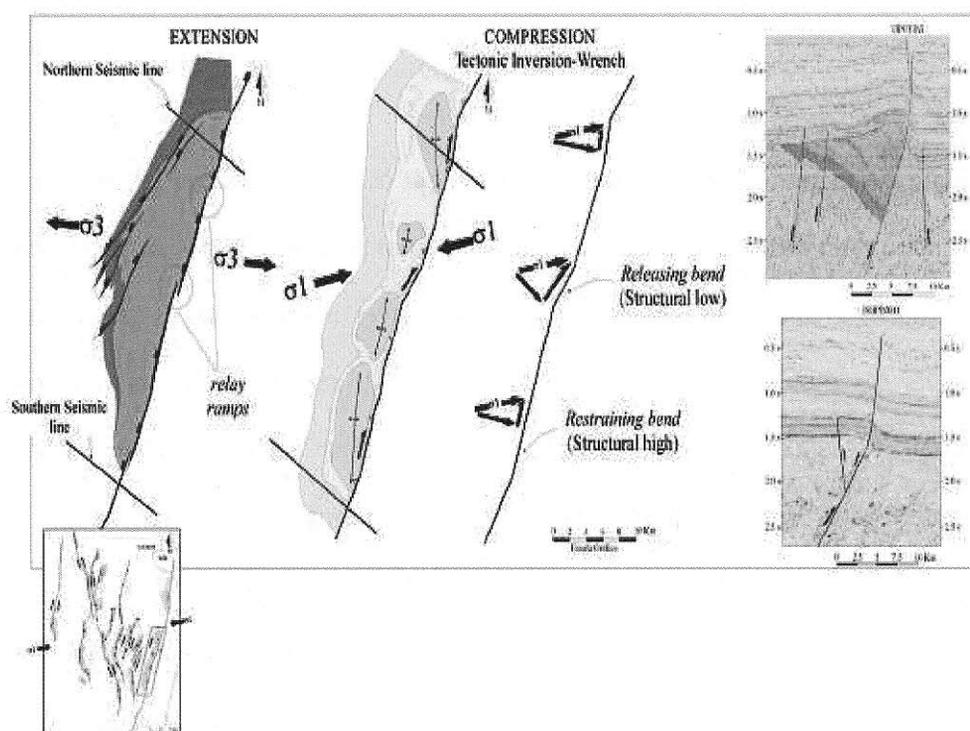


Figura 11 – Feições distensionais e compressionais na estrutura ITT  
Fonte: BELOTTI *et al.* (2003).

A inversão tectônica das falhas foi favorecida onde o campo de esforço compressional foi reativado em planos de falhas lítricas 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 11).

#### 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 12 e Figura 13 ilustram, respectivamente, a seção geológica e a carta estratigráfica geral desta bacia equatoriana.

##### 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 ardórias 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 mas pode ser estimada em no máximo 1250 m (TSCHOPP, 1953).

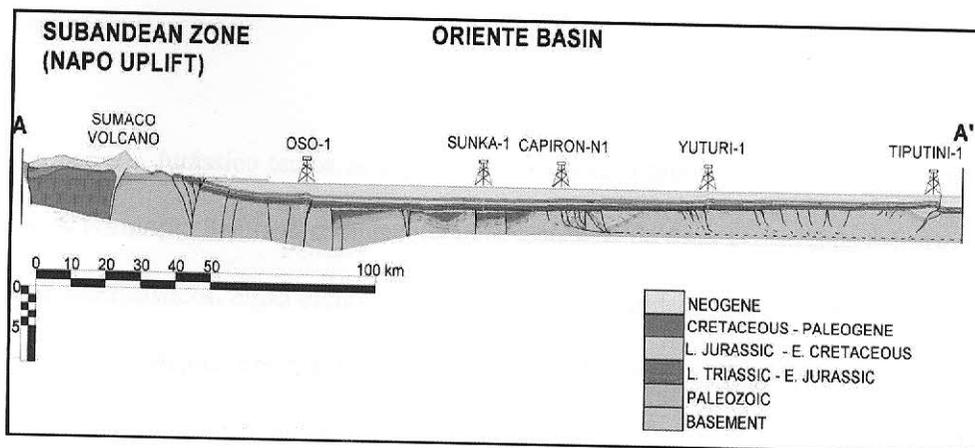


Figura 12 – Seção geológica da Bacia Oriente  
 Fonte: BABY et al. (2004).

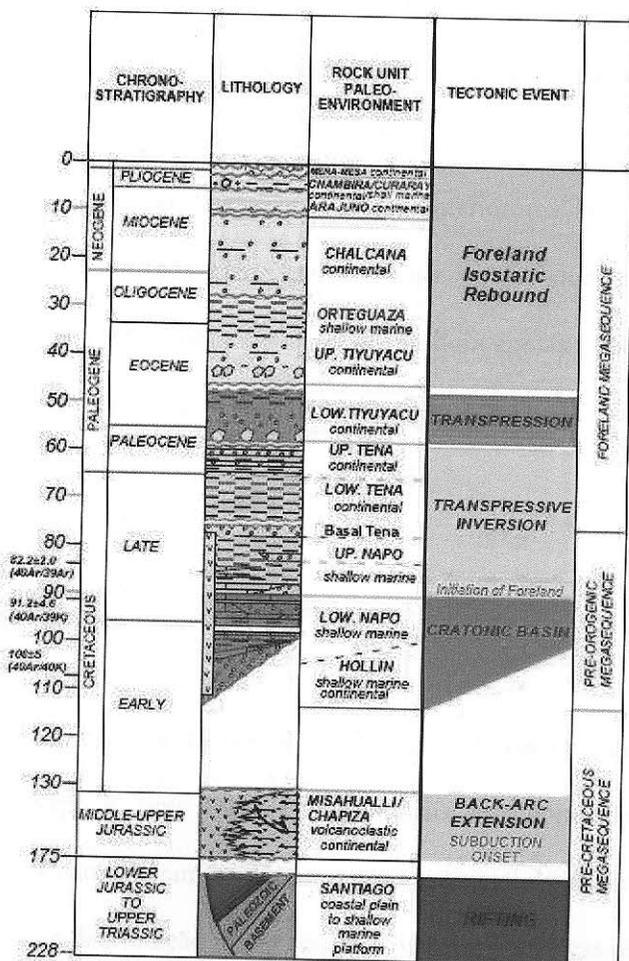


Figura 13 – Diagrama estratigráfico da Bacia Oriente  
 Fonte: BARRAGÁN et al. (2005).

#### 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 14 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 megassequência Hollin-Napo-Tena Basal, enfatizando os intervalos clásticos correspondentes aos arenitos Hollin Principal, T, U, M2, M1 e Tena Basal (BARRAGÁN *et al.*, 2004).

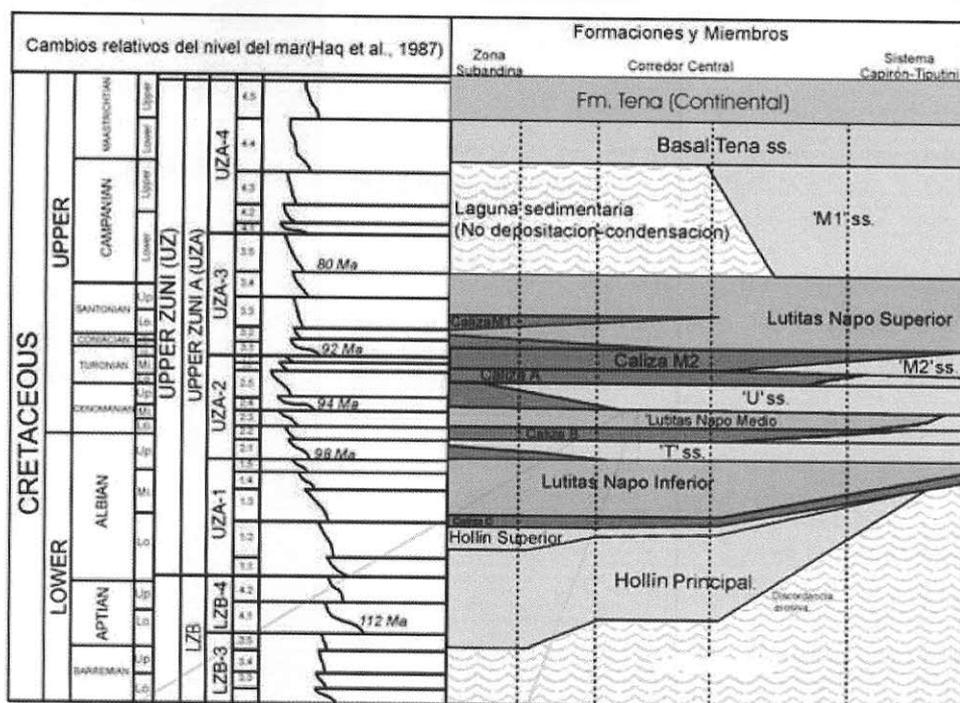


Figura 14 – Formações, membros e ciclos sedimentares do Cretáceo da Bacia Oriente, e suas relações com a curva eustática.

Fonte: HAQ *et al.* (1987) *apud* CHRISTOPHOUL *et al.* (2004).

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; 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 o Hollin Principal e o Superior são diacrônicos e seguem a ascensão total do nível do mar durante a deposição das formações Hollin Superior e deposição do Napo Inferior (WHITE *et al.*, 1995).

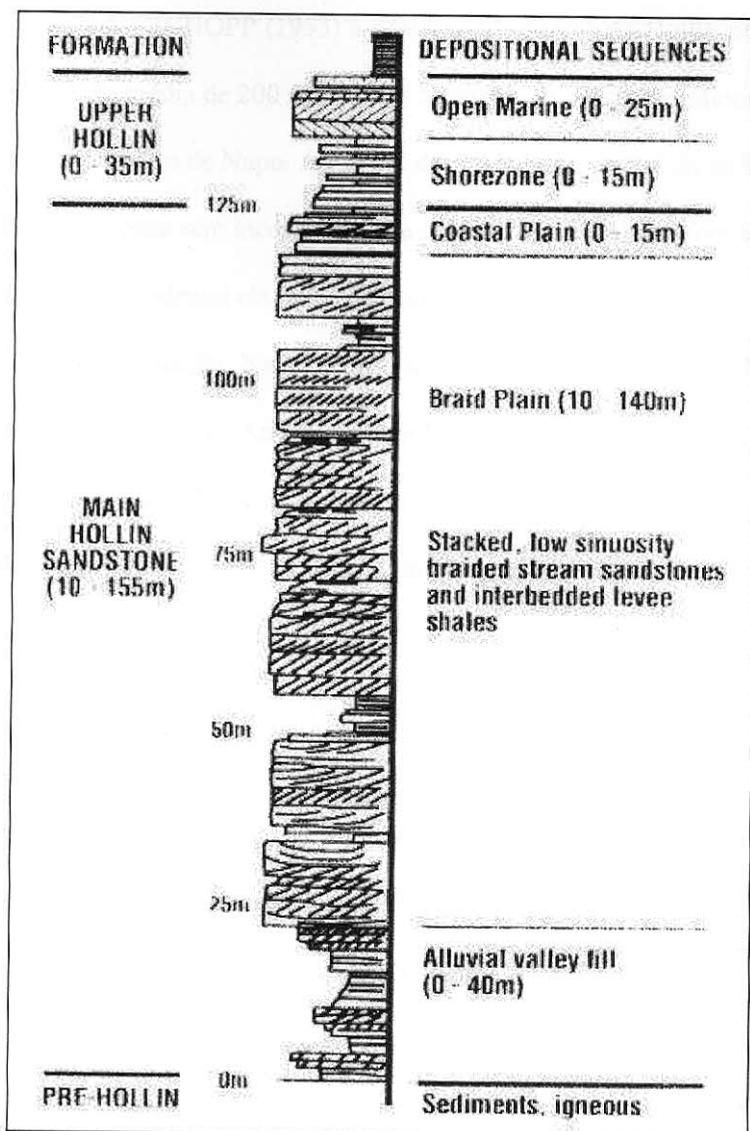


Figura 15 – Sequências deposicionais da Formação Hollin  
Fonte: WHITE *et al.* (1995)

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 metros nas Montanhas Cutucú Meridional e de aproximadamente 150 metros' 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-acizentado, 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 acizentados, cinza escuro e preto.

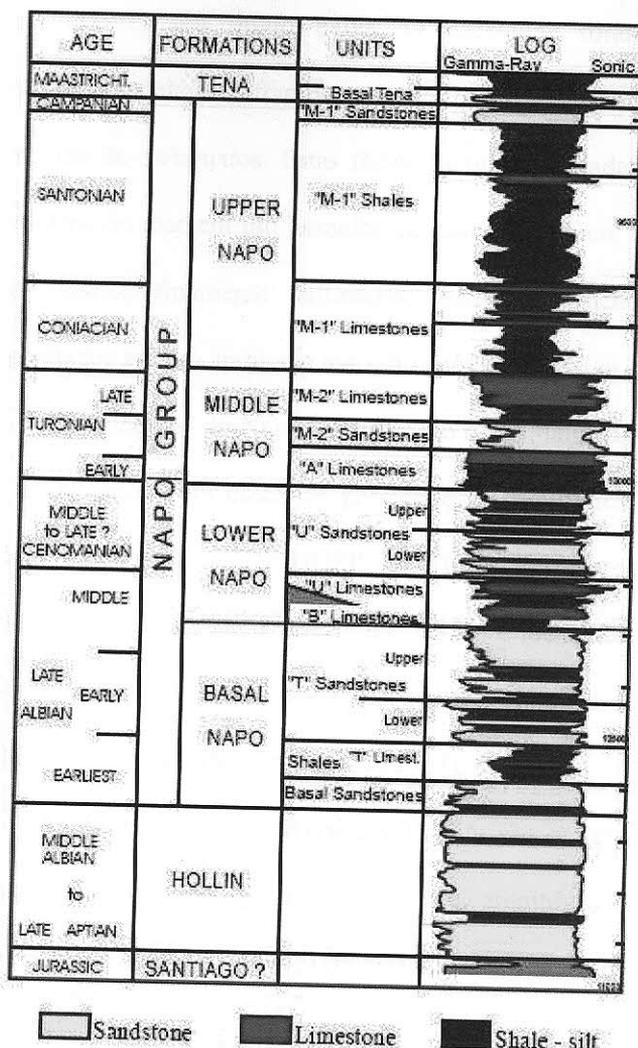


Figura 16 – Estratigrafia da Formação Napo  
 Fonte: JAILARD *et al.* (1996).

A Figura 16 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).

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 consiste 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 contem fragmentos de peixes e camadas bivalves depositados em um ambiente marinho anóxico de baixa energia (HUNTER *et al.*, 2000).

Os folhelhos do 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 da base Pós-Napo e consistem de folhelhos, arenitos e conglomerados menores. O intervalo Hollin-Napo consiste de cerca de 500 metros 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 17).

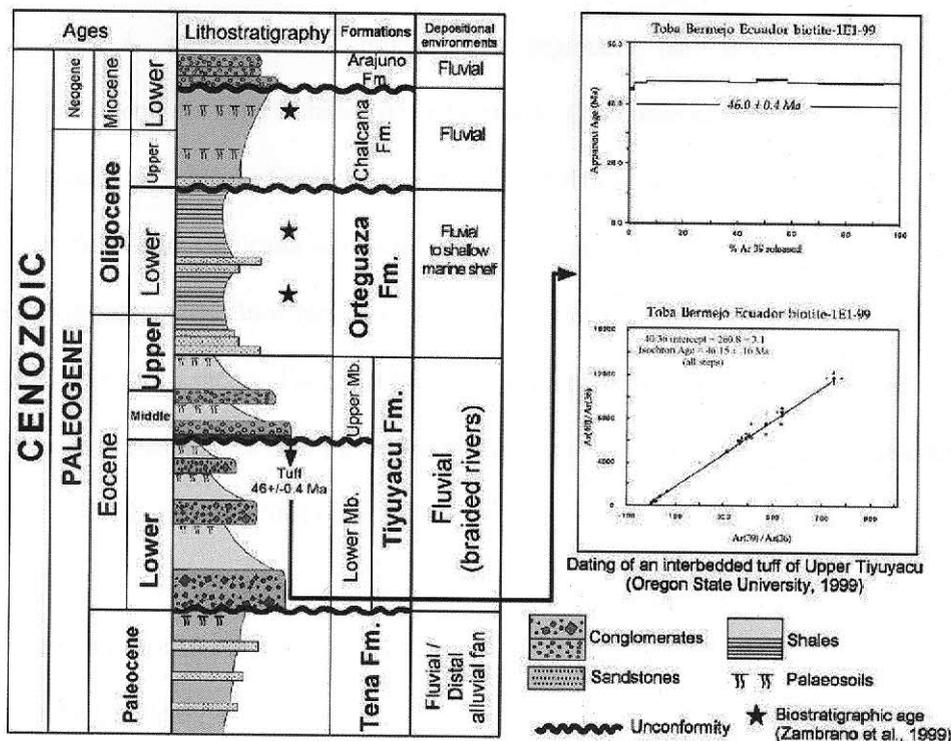


Figura 17 – Estratigrafia do período Paleoceno-Quaternário  
 Fonte: BABY et al. (1999)

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 (MAROCCO et al., 1996; VALDEZ PARDO, 1997; CHRISTOPHOUL, 1999) e pode ser dividido em 2 membros (Inferior e Superior) baseado em argumentos sedimentológicos e estruturais.

A Formação Ortequaza sobrepõe 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.*, 2001).

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.*, 2001).

## 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), 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.

Observando as bacias de Putumayo e Marañon, onde parte da sedimentação sobre o pacote paleozóico teve características similares de deposição com a Bacia Oriente, podemos suspeitar da existência de acumulação de gás e condensado (GARMEZY *et al.*, 1997).

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 (ALAVARADO *et al.*, 1985).

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.*, 1985) e por correlação com a Formação Pucará do Peru (rocha geradora provada segundo PERUPETRO; q.v <http://mirror.perupetro.com.pe/home-e.asp> ) apresentam níveis de pelitos negros com boas características quantitativas e qualitativas para rocha geradora. A espessura da formação é estimada entre 1000 e 2700 metros. 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 18).

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

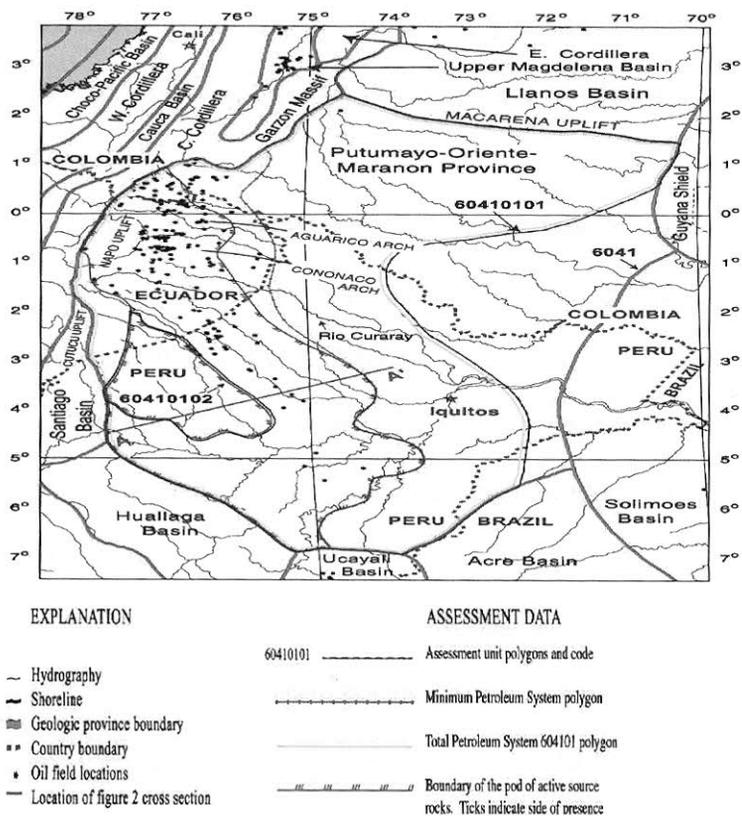


Figura 18 – Na Província Putumayo-Oriente-Marañon, a região de maturação termal para óleo (para dentro do polígono de linha de contorno verde) e para gás (para fora da linha) geração de rochas geradoras do Cretáceo, e locações de produção de campos. Fonte: HIGLEY (2000).

#### 4.5.3 Reservatório

Conforme já informado no primeiro capítulo deste texto, 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 (RIVADENEIRA & BABY, 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 se tornam 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) (RIVADENEIRA & BABY, 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 (RIVADENEIRA & BABY, 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 “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 (RIVADENEIRA & BABY, 2004).

Os óleos pesados desenvolvem-se na direção sul, evento que corresponde com o incremento no conteúdo do enxofre, inversamente proporcional à diminuição do grau API, encontrando-se óleo altamente sulfuroso. 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% (RIVADENEIRA & BABY, 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 (RIVADENEIRA & BABY, 2004)

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

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

Um 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 394 metros (RIVADENEIRA & BABY, 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 (RIVADENEIRA & BABY, 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 (RIVADENEIRA & BABY, 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 19) (RIVADENEIRA & BABY, 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 traçamento (RIVADENEIRA & BABY, 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 (RIVADENEIRA & BABY, 2004).

O grau API do óleo flutua entre 24° e 32° com predomínio dos óleos com menos de 30° API. (RIVADENEIRA & BABY, 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 (RIVADENEIRA & BABY, 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 19), 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.

Os campos Ishpingo, Tambococha e Tiputini se localizam no extremo da Bacia Oriente (ver Figura 2), 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.

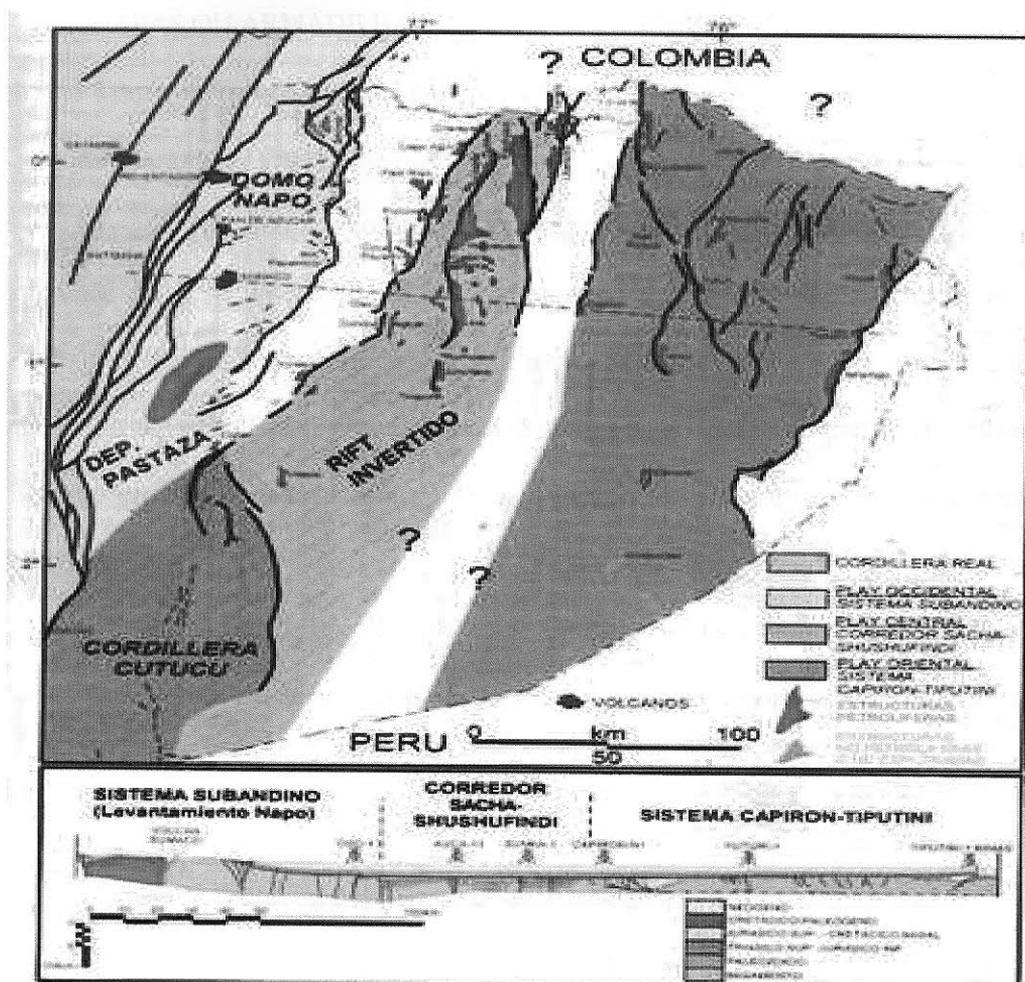


Figura 19 – Mapa e seção estrutural da Bacia Oriente com seus três corredores estruturais-petrolíferos  
 Fonte: BABY *et al.* (2004).

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 semigrábens 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 lítrica 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 MÉTODO GEOFÍSICO: GRAVIMETRIA

### 5.1 Introdução

#### 5.1.1 HISTÓRIA DA GRAVIDADE E DO INÍCIO DE SUA EXPLORAÇÃO

Se levarmos em consideração toda a história da humanidade, pode se dizer que a força de atração entre corpos devido a suas massas passou incompreendida até pouco tempo atrás. A idéia dos filósofos gregos, por exemplo, de que o Sol, planetas do nosso sistema solar e demais estrelas orbitavam em torno da Terra por meio de um “movimento natural” determinado pelos deuses perdurou até o século XVI.

Galileu Galilei foi o primeiro a trabalhar com a idéia de objetos de diferentes pesos, ou seja, o foi primeiro a explorar propriedades da força de atração entre corpos. Diz a lenda ainda que, em 1589, Galileu soltou objetos de diferentes pesos do alto da inclinada Torre de Pisa para tentar determinar como o peso afetaria a velocidade de queda dos objetos. No início do século seguinte, baseado nas minuciosas anotações astronômicas de Thycho Brahe, Johannes Kepler postulou as leis do movimento planetário. Isto permitiu a Sir Isaac Newton descobrir a Lei da Gravitação Universal, no final do século XVII. Há histórias que dizem que Newton estava assentado encostado em uma macieira quando viu uma maçã cair da copa da árvore. Com isso formulou a hipótese de que todos os corpos se atraem devido a suas massas e que a mesma força que fazia a maçã cair em direção à Terra deveria estar agindo de forma a manter as órbitas dos planetas ao redor do Sol e a órbita dos satélites ao redor de planetas, como a Lua em relação à Terra.

Pierre Bouguer, por meio das expedições da Academia Francesa de Ciências ao norte da Europa e ao Peru, em 1735-45, pôde estabelecer muitas das características básicas da

gravidade, tais como variação da gravidade com altitude e latitude, a atração gravitacional horizontal devida a montanhas e a densidade da Terra.

Em 1817, Henry Kater colocou à disposição uma ferramenta que se tornou dominante na investigação da gravidade por mais de um século: o pêndulo composto. Considerando que as variações na atração gravitacional eram muito pequenas, o nobre e físico Roland von Eötvös passou a medir derivadas ao invés de magnitudes totais da força gravitacional. Eötvös criou sua primeira balança de torção (uma modificação da balança de Coulomb) em 1890 e fez seu primeiro levantamento gravitacional no Lago Balaton em 1901. Com este tipo de balança, Eötvös calculou também com incrível precisão a equivalência entre massa gravitacional e inercial com uma diferença entre elas da ordem de uma parte em  $10^{-9}$ . Em 1923, F.A. Vening Meinesz fez medidas de gravidade utilizando pêndulos, a bordo de um submarino alemão, e demonstrou que havia variações gravitacionais em varias áreas dos oceanos, especialmente em regiões próximas à fossa da Indonésia.

Em Dezembro de 1922, iniciou-se a exploração geofísica para óleo: um levantamento feito por balança de torção do campo de óleo Spindletop. No final de 1924, um poço de teste no domo de sal Nash, no condado de Brazoria, Texas, foi feito para conferir uma interpretação gravimétrica, e se tornou a primeira fonte de hidrocarbonetos descoberta por meio da geofísica.

Inúmeros levantamentos por gravidade foram feitos na última metade da década de 1920 por meio de balanças de torção. Em 1929 o pêndulo portátil começou a ser utilizado e, em 1932, o gravímetro estático (e o gravímetro astático, que não foi descrito a público até a chegada de 1937). Por volta de 1940, os gravímetros se tornaram tão confiáveis e apropriados que balanças de torção e pêndulos portáteis deixaram de ser utilizados. LaCoste (1934) descreveu o gravímetro de medidas relativas de gravidade Mola de Comprimento-Zero, mas o gravímetro de LaCoste começou a ser utilizado somente em 1939. Nos anos subseqüentes,

gravímetros foram adaptados para efetuar medidas embaixo d'água, em navios, em aeronaves e helicópteros.

A partir de 1940 foram também desenvolvidos métodos gráficos e de malha para se isolar anomalias gravitacionais. O aumento da capacidade de processamento de dados com desenvolvimento de computadores digitais a partir de 1960 vem aumentando consideravelmente os recursos de interpretação.

### 5.1.2 INFORMAÇÕES GERAIS SOBRE O MÉTODO

Conforme já mencionado, a gravimetria busca obter informações relevantes por meio de medidas das variações no campo gravitacional da Terra. Visando localizar porções de massa de densidades diferentes das formações que as rodeiam, espera-se compreender algo sobre essas porções através de anomalias no campo gravitacional terrestre.

No ramo da exploração de hidrocarbonetos, o método gravimétrico é geralmente utilizado como uma ferramenta de reconhecimento do terreno de interesse. Apesar de ser caro, o levantamento gravimétrico é ainda consideravelmente mais barato do que a aquisição de dados sísmicos. A interpretação sísmica também utiliza os dados gravimétricos como forma de corroborar ou refutar feições de interesse, bem como forma de ajudar a delimitar outras estruturas nas formações geológicas. A gravimetria é também utilizada como ferramenta secundária no ramo da mineração, é utilizada em estudos arqueológicos e é algumas vezes usada pela engenharia.

Tal como métodos que exploram o magnetismo, a radioatividade e algumas técnicas elétricas, o método gravimétrico é um método passivo, que utiliza uma fonte natural, a gravidade. Técnicas gravimétricas e magnetométricas são geralmente agrupadas em um mesmo conjunto denominado de Métodos Potenciais, mas há algumas diferenças básicas entre

estes métodos. Gravidade é uma propriedade intrínseca da matéria, mas o magnetismo dos materiais é mais diversificado. Alguns materiais possuem estado magnético permanente, enquanto outros materiais dependem de fatores como campos magnéticos de indução externos e/ou da orientação de domínios magnéticos. Enquanto variações gravitacionais em um dado local são muito pequenas quando comparadas ao campo gravitacional terrestre, anomalias magnéticas são geralmente grandes quando comparadas ao campo magnético terrestre do local. Mudanças temporais do campo gravitacional terrestre são poucas e previsíveis, mas a variação temporal do campo magnético é complexa. As leituras de gravidade têm que passar por um processo de correções mais complicado e de maior relevância do que o processo de correções do método magnetométrico ou de outros métodos geofísicos. Finalmente, a aplicação do método gravimétrico é mais cara do que a aplicação do método magnetométrico.

### 5.1.3 INTRODUÇÃO AO ESTUDO DE CASO

Esse capítulo tratará primeiramente da teoria envolvida em Gravimetria. Em seguida, será analisado um estudo de caso em que há uma aplicação prática baseada na Gravimetria.

## 5.2 Gravidade princípios físicos e equações relacionadas

### 5.2.1 Isaac Newton e a Lei da Gravitação Universal

Conforme já mencionado, Isaac Newton se baseou nas descobertas de Galileu e nas leis de Kepler para descobrir a Lei da Gravitação Universal. Analisando as leis de Kepler, Newton percebeu que as velocidades dos planetas variavam ao longo das órbitas em módulo e direção. Mas, de acordo com sua primeira lei, a velocidade de um corpo só se altera sob a ação de forças externas. Com isso, Newton concluiu que forças que agiam à distância, às quais ele

denominou de forças gravitacionais, faziam com que o Sol, planetas e satélites naturais interagissem. Tendo um profundo conhecimento de matemática e grande capacidade de generalização, Newton formulou a Lei da Gravitação Universal: a força gravitacional entre dois corpos de massas  $m_1$  e  $m_2$  é diretamente proporcional ao produto das massas e inversamente proporcional ao quadrado da distância entre os centros de massa desses corpos. Vale ressaltar que a constante de proporcionalidade dessa equação, definida como  $G$ , foi determinada numericamente pela primeira vez posteriormente, por Henry Cavendish. Temos então que

$$F = -G (m_1 m_2 / r^2) \quad (5.1)$$

Nesta equação,  $F$  é a força de  $m_1$  sobre  $m_2$ ,  $r_1$  é um vetor unitário que acompanha a direção de crescimento de  $r$ ,  $r$  é a distância entre os dois corpos, com origem no centro de massa de  $m_1$  e a constante de proporcionalidade é  $G$ , cujo valor no SI de unidades é de  $6.672 \times 10^{-11} \text{ Nm}^2 / \text{kg}^2$  (Marion, 1995). Note que a força gravitacional entre dois corpos é sempre atrativa.

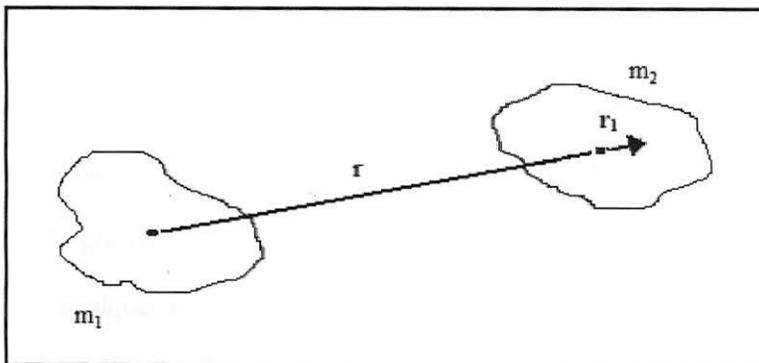


Figura 20 – Atração entre dois corpos, sendo  $r$  a distância entre os centros de massa destes.

### 5.2.2 A aceleração gravitacional terrestre

Primeiramente leva-se em consideração a Segunda Lei de Newton, que postula que, para um corpo de massa constante  $m$ , a força resultante  $\mathbf{F}_R$  e aceleração  $\mathbf{a}$  produzida neste corpo devida a essa força possuem intensidades diretamente proporcionais, ou

$$\mathbf{F}_R = m\mathbf{a} \quad (5.2)$$

Substituindo-se então  $m_1$  na equação 5.1 pela massa da Terra,  $M_T$ , e pelo raio da Terra  $R_T$ , supondo por enquanto uma Terra perfeitamente esférica e impondo que a única força que age sobre a massa  $m_2$  é a força gravitacional da Terra, teremos que  $\mathbf{F}_R = \mathbf{F}$  neste caso para  $m_2$ , ou

$$m_2\mathbf{a} = -G (M_T m_2 / R_T^2) \mathbf{r}_1 \quad (5.3a)$$

$$\mathbf{a} = \mathbf{g} = -G (M_T / R_T^2) \mathbf{r}_1 \quad (5.3b)$$

Vale ressaltar que essa é a aceleração para pontos *externos* à superfície da Terra mas próximos desta superfície. Utilizando uma aproximação somente para uma análise superficial nesse momento com  $M_T = 5,98 \times 10^{24} \text{ Kg}$  (LOWRIE, 1997),  $R_T = 6371 \text{ Km}$ , onde  $R_T$  é o raio da esfera equivalente à forma da Terra (q.v LOWRIE, 1997, p.46) e  $G = 6.672 \times 10^{-11} \text{ Nm}^2 / \text{kg}^2$ , a atração gravitacional terrestre, definida como  $\mathbf{g}$  (mesmo para a atração gravitacional de um corpo qualquer de massa  $m$ , a aceleração seria definida como  $\mathbf{g}$ ), tem o valor próximo de  $9,83 \text{ m/s}^2$ , ou  $983 \text{ cm/s}^2$ .

Em gravimetria, o maior interesse são acelerações e não forças, sendo que a unidade de aceleração utilizada nas detecções de variações no campo gravitacional terrestre é em geral o miliGal, onde  $1 \text{ Gal} = 1 \text{ cm/s}^2$  foi criada em homenagem a Galileu Galilei. Como 1 miliGal

equivale a aproximadamente uma parte em  $10^6$  em relação ao campo gravitacional terrestre total, confirma-se o que já foi dito: que a variação de gravidade no campo gravitacional total, causada por uma dada distribuição de massa local, é ínfima. Percebe-se então que os gravímetros utilizados para detectar variações no campo gravitacional total, que dependendo são capazes de detectar anomalias da ordem de uma parte em  $10^8$  ou menos, são equipamentos extremamente sensíveis.

### 5.2.3 O potencial gravitacional de uma partícula

O campo gravitacional é um campo conservativo, ou seja, para se calcular o trabalho realizado ao se deslocar um corpo sob ação desse campo, não é preciso saber o caminho percorrido pelo corpo, mas somente os pontos iniciais e finais. A força  $\mathbf{F}$  gerada por um campo conservativo pode ser obtida através de um potencial escalar, denominado de potencial Newtoniano ou potencial tri-dimensional  $U(x,y,z)$ , através do gradiente desse potencial. Teremos então, para duas massas pontuais  $m_1$  e  $m_2$ :

$$-\nabla U(x, y, z) = \mathbf{F}(x,y,z)/m_2 \quad , \quad (5.4a)$$

onde  $m_2$  é uma das massas sujeita à ação da força gravitacional de  $m_1$ . Logo,

$$-\nabla U(x, y, z) = \mathbf{g}(x,y,z) \quad (5.4b)$$

ou, em coordenadas esféricas, teremos que

$$-\nabla U(r, \theta, \phi) = \mathbf{g}(r, \theta, \phi) \quad (5.4c)$$

Mas sabemos que  $\mathbf{g}$  não é função dos ângulos esféricos, somente do raio  $r$ . Temos então que

$$-\nabla U(r, \theta, \phi) = -\frac{\partial U}{\partial r} \mathbf{r}_1 - \frac{1}{r} \frac{\partial U}{\partial \theta} \boldsymbol{\theta}_1 - \frac{1}{r \sin \theta} \frac{\partial U}{\partial \phi} \boldsymbol{\phi}_1 = \mathbf{g}(r, \theta, \phi) = -G (m_1 / r^2) \mathbf{r}_1, \quad (5.5)$$

onde  $\boldsymbol{\theta}_1$  e  $\boldsymbol{\phi}_1$  são os vetores unitários na direção de variação dos ângulos  $\theta$  e  $\phi$ , respectivamente.

Obtêm-se finalmente as relações abaixo

$$\frac{\partial U}{\partial r} = G (m_1 / r^2) ; \quad \frac{\partial U}{\partial \theta} = 0 ; \quad \frac{\partial U}{\partial \phi} = 0 \quad (5.6)$$

Logo, o potencial gravitacional devido a uma massa pontual  $m_1$  arbitrária será:

$$U = - G (m_1 / r) + k \text{ (constante arbitrária)} \quad (5.7a)$$

E, impondo que o potencial é zero no infinito,  $U(r \rightarrow \infty) = 0$ , obtemos a equação final:

$$U = - G (m_1 / r) \quad (5.7b)$$

Teremos ainda, analisando a equação (5.4b), as seguintes relações de derivadas parciais:

$$\frac{\partial U}{\partial x} = -g_x ; \quad \frac{\partial U}{\partial y} = -g_y ; \quad \frac{\partial U}{\partial z} = -g_z ; \quad (5.8)$$

Mais adiante será explicado por que o valor de interesse para gravímetros é apenas  $-g_z$ .

As derivadas parciais à segunda e à terceira do potencial gravitacional também são utilizadas em técnicas de análise de anomalias gravitacionais. A *Gradiometria* utiliza essas derivadas.

### 5.3 Distribuições de massa: potencial gravitacional e acelerações

#### 5.3.1 O POTENCIAL GRAVITACIONAL DE UMA DISTRIBUIÇÃO DE MASSA

##### 5.3.1.1 Cálculo do potencial gravitacional

Na subseção anterior, tratou-se do potencial gravitacional de uma massa pontual. Analisar-se-á agora o potencial gravitacional de uma distribuição de massa  $M$  tridimensional. A forma de raciocinar é considerando que essa distribuição é construída através de inúmeras massas pontuais, definidas aqui como  $dm$ , onde  $\sum dm = M$ . Supondo um corpo com densidade constante  $\rho$ , volume  $V$  e massa  $M$ , teremos que

$$M/V = dm/dV, \quad (5.9)$$

mas  $M/V = \rho$ , logo,

$$dm = \rho dV, \quad (5.10)$$

onde  $dV = dx dy dz$  e é um elemento infinitesimal de volume.

O potencial gravitacional  $dU$  em um ponto  $P$ , devido a um elemento infinitesimal de massa  $dm$ , será:

$$dU = -G \frac{dm}{r(x, y, z)} = -G\rho \frac{dV}{r(x, y, z)} \quad (5.11)$$

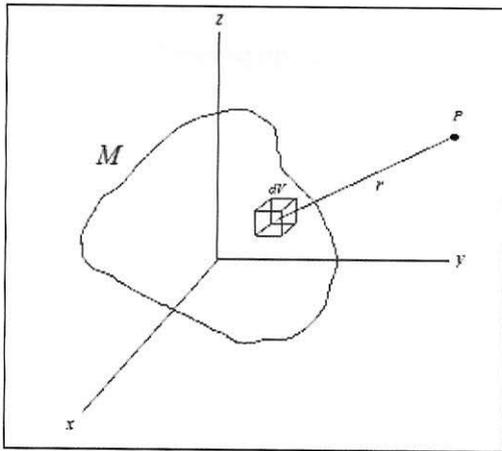


Figura 21 – Distância  $r$ , em relação a um ponto  $P$ , de um elemento de massa  $dm$  arbitrário com volume  $dV$ .

Para uma distribuição de massa contínua e homogênea  $M$  (figura 21), teremos que  $\int dm = M$  e que também o potencial gravitacional em um ponto  $P$  devido a essa massa será:

$$U = -G\rho \iiint_{x y z} \frac{1}{r(x, y, z)} dx dy dz \quad (5.12)$$

Para o caso em que a distribuição de massa  $M$  é uma esfera maciça, em um ponto  $P$  externo à distribuição obteremos o seguinte potencial gravitacional, como intuitivamente já se esperava:

$$U = -G (M/r), \quad (5.13)$$

onde  $r$  é a distância do centro da esfera ao ponto P. É interessante notar que, partindo da relação 5.13 e aplicando a equação 5.4b, pode-se calcular a aceleração gravitacional.

O cálculo em 5.12 pode ser efetuado para várias distribuições de massa que tenham alguma simetria. Podem ser inclusive distribuições de massa uni ou bidimensionais. Uma análise mais aprofundada dessas distribuições será comentada mais adiante.

### 5.3.1.2 Superfícies equipotenciais

Superfícies equipotenciais são superfícies em que um dado potencial é constante. Vamos considerar o caso de uma esfera maciça perfeita de raio  $R$  e densidade constante  $\rho$ , por exemplo. O potencial gravitacional gerado por esta esfera é constante para um raio arbitrário  $r_1 > R$ , onde  $r_1$  é constante e tem sua origem no centro da esfera. De fato, para cada um dos raios constantes  $r_1, r_2, r_3, \dots, r_n$ , maiores que  $R$ , existirá uma superfície equipotencial  $S_1, S_2, S_3, \dots, S_n$  que será esférica e concêntrica em relação à esfera maciça.

O trabalho para se deslocar um dado objeto entre dois pontos quaisquer de uma única superfície equipotencial é nulo. O campo gravitacional  $\mathbf{g}$  gerado por uma distribuição de massa incidirá perpendicularmente em qualquer ponto de uma superfície equipotencial gravitacional dessa distribuição.

## 5.3.2 ACELERAÇÕES

### 5.3.2.1 A aceleração gravitacional devido a uma distribuição de massa

Imagine a situação em que se observa um terreno basicamente plano e de área extensa. Para o tratamento em questão, suponha que a superfície desse terreno corresponda a uma camada homogênea e de densidade  $\rho = 1.7 \text{ g/cm}^3$ , relativamente constante a até uma

profundidade razoável. Se no meio desta camada existe em certo local uma distribuição de massa de densidade  $\rho = 3.1 \text{ g/cm}^3$ , uma leitura gravimétrica no terreno em um ponto P próximo a essa massa detectará uma anomalia positiva na gravidade do local. É importante ressaltar que somente a componente  $g_z$  da distribuição de massa alterará a leitura instrumental gravimétrica. A figura abaixo ilustra isso.

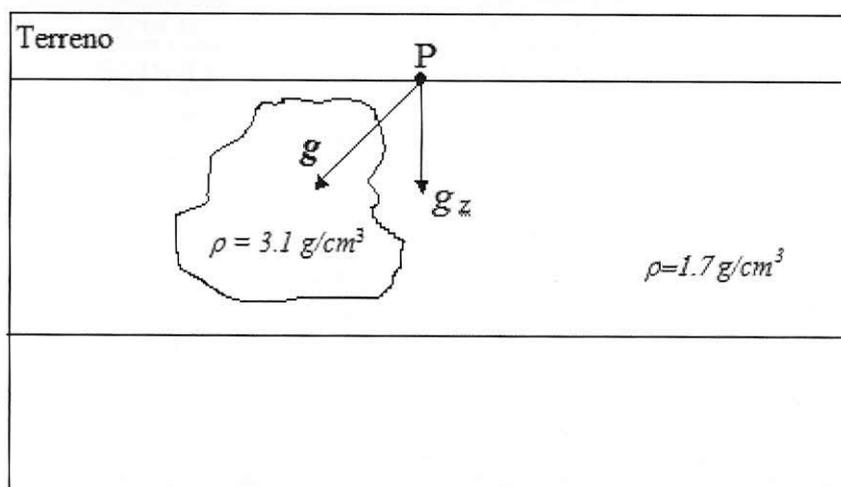


Figura 22 – Os eixos  $x$  e  $y$  estão paralelos ao plano do terreno e o eixo  $z$  perpendicular ao plano

A conclusão é que diferentes materiais de diferentes densidades podem produzir diversos tipos de variações no campo gravitacional total de um local. Através da figura 22, fica claro que o que mais importa em medidas gravimétricas é o contraste entre densidades dos materiais. É importante enfatizar que o que mais importa em gravimetria é a variação lateral de densidade no terreno. Se a distribuição de massa da figura 22 também tivesse uma densidade  $\rho = 1.7 \text{ g/cm}^3$ , então nenhuma variação seria percebida pelo gravímetro.

A unidade de densidade no Sistema Internacional é o  $\text{kg/m}^3$  e, apesar da unidade  $\text{g/cm}^3$  ainda ser aceita em medidas gravimétricas, vem sendo substituída gradativamente pelo  $\text{kg/m}^3$ .

O quadro 1 mostra a densidade de diferentes tipos de material.

Material	Densidade (g/cm <sup>3</sup> )	
	Variação	Média
Ar	~0	
Água Pura	1	
Água do Mar		1,027
Gelo		0,92
Arenito	1,65 - 2,8	2,22
Folhelho	1,95 - 2,7	
Calcário	1,55 - 2,75	
Dolomito	2,72 - 2,84	
Anidrita	2,82 - 2,93	
Grauvaca	2,67 - 2,7	
Marga		2,63
Sal	1,9 - 2,2	
Granito	2,4 - 2,9	2,66
Basalto	2,7 - 3,1	2,88
Dolerito/Diabásio	2,4 - 3,2	2,89
Quartzo-Diorito	2,5 - 2,95	2,85
Andesito	2,1 - 3,1	2,59
Gabro/Norito	2,6 - 3,2	2,95
Peridotito	3,15 - 3,28	
Quartzo-pórfiro	2,4 - 2,8	2,62
Riolito	2,1 - 2,85	2,51
Sienito	2,45 - 3,0	2,67
Traquito	2,2 - 2,85	2,57
Tonalito	2,6 - 2,9	2,67
Granodiorito	2,67 - 2,79	
Rochas Metamórficas	2,59 - 3,15	

Quadro 1 – Tabela de densidade de diversos materiais

Fonte: BUONORA(2007)

Na subsecção 5.3.1.1, foi colocada a observação de que, ao obter-se o potencial gravitacional de uma dada distribuição de massa, torna-se possível, através da relação 5.4b,

obter também a aceleração gravitacional devido a essa distribuição. Mas se supusermos novamente que a distribuição de massa é contínua e de densidade constante, podemos subdividi-la em elementos infinitesimais de massa  $dm$ . Analisando então o módulo da aceleração gravitacional devido a esses elementos teremos:

$$\|dg\| = G dm / r^2 \quad (5.14)$$

Pode-se agora calcular a aceleração gravitacional causada por uma distribuição de massa em um ponto P. Teremos três casos: Primeiramente, uma distribuição de massa com densidade linear  $\lambda$ , como um fio infinito ou um anel circular. Uma distribuição de massa com densidade de área  $\sigma$ , como um disco achatado. Finalmente, uma distribuição com densidade volumétrica  $\rho$ , como uma esfera ou um cilindro maciços, por exemplo. Para o caso de densidade linear  $\lambda$  teremos:

$$-G (dm) / r^2 = -G (\lambda dl) / r^2 , \quad (5.15)$$

onde  $r$  é a distância do elemento de massa  $dm$  ao ponto P e  $dl$  é o comprimento infinitesimal do elemento de massa  $dm$ . Para o caso de densidade de área  $\sigma$  teremos:

$$-G (dm) / r^2 = -G (\sigma dA) / r^2 , \quad (5.16)$$

onde  $dA$  é a área infinitesimal de um elemento  $dm$  dessa distribuição.

Finalmente, para o caso de densidade volumétrica  $\rho$  teremos:

$$-G (dm) / r^2 = -G (\rho dV) / r^2 \quad (5.17)$$

Para efetuar as integrações, é necessário analisar quais as componentes do vetor de aceleração  $dg$  interessam ao problema em questão.

É possível ter uma compreensão bem aprofundada sobre esses cálculos (q.v. TELFORD *et al.*, 1990, p.35-44).

### 5.3.2.2 A aceleração centrípeta

A lei da inércia de Isaac Newton atesta que um corpo tende a permanecer em repouso ou em um movimento uniforme ao longo de uma linha reta a menos que uma força aja sobre o corpo e modifique esse estado. Conforme já dito, Newton se baseou nesse raciocínio para perceber que o Sol, os planetas e satélites naturais tinham que estar interagindo por meio de forças que agiam à distância.

A equação que nos dá o módulo da força centrípeta  $F_c$  em um corpo que gira com velocidade constante é:

$$\|F_c\| = mv^2/r = m\omega^2r, \text{ com } v = \omega r \quad (5.18)$$

Tendo que  $m$  é a massa do corpo que gira,  $v$  é o módulo de sua velocidade constante linear,  $\omega$  o módulo de sua velocidade angular ( em radianos por segundo) e  $r$  é o raio circular da trajetória do corpo. E como a força centrípeta é a força resultante, teremos:

$$\|F_c\| = m\omega^2r = m \|a\| \quad (5.19)$$

Finalmente, partindo da equação 5.19 teremos a relação para o módulo da aceleração centrípeta  $\|a_c\|$  que agirá sobre o corpo que está girando:

$$\|a_c\| = \|a\| = \omega^2 r \quad (5.20)$$

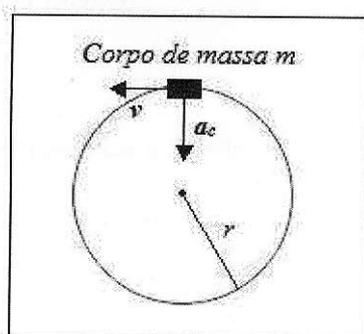


Figura 23 – Corpo de massa  $m$  em uma trajetória circular

Imagine agora um corpo tridimensional, como uma casca esférica coesa de massa  $M$  e raio  $R$ , que esteja com uma rotação angular  $\omega$  constante em torno de seu próprio eixo. Os elementos infinitesimais de massa  $dm$  da superfície da esfera também experimentarão acelerações centrípetas. Entretanto, essa aceleração não será a mesma em todos os pontos da esfera. Através da equação 5.20, percebe-se que a aceleração centrípeta é diretamente proporcional a  $r$ , nesse caso de velocidade angular constante  $\omega$ . Se dividirmos a esfera em diversas seções circulares paralelas entre si e perpendiculares ao seu eixo de rotação fica claro o fato de diferentes acelerações centrípetas. Elementos de massa  $dm$  que formam a seção circular que contém o centro da esfera, ou seja, a seção que divide a esfera em metades iguais, experimentarão a maior aceleração centrípeta no corpo, de valor  $\omega^2 R$ . À medida em que percorremos os setores da esfera em direção aos “pólos norte e sul” desta, a aceleração centrípeta sobre os elementos de massa  $dm$  vai diminuindo, em decorrência da diminuição dos raios dos setores. Finalmente, nos “pólos norte e sul” da esfera, os elementos de massa não

experimentarão nenhuma aceleração, simplesmente porque nesses pólos o raio é zero. A equação que expressa o módulo da aceleração centrípeta em um setor circular arbitrário dessa esfera será:

$$\|a_c\| = \omega^2 (R \cos \theta) \quad , \quad (5.21)$$

onde  $\theta$  representa o ângulo de latitude no corpo e  $(R \cos \theta)$  o raio de uma seção circular a esta latitude (figura 24). Vale ressaltar que o vetor aceleração centrípeta estará direcionado ao centro da seção circular e não ao centro da esfera.

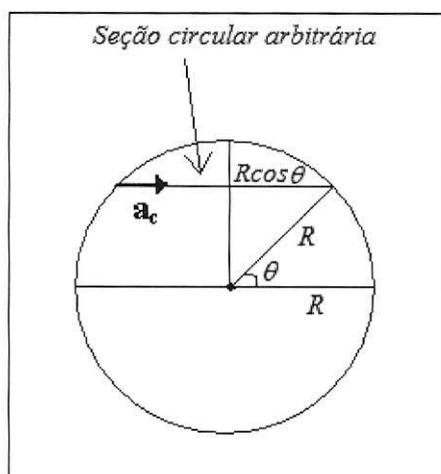


Figura 24 – Aceleração centrípeta em uma seção circular arbitrária

### 5.3.2.3 A aceleração centrífuga

Suponha que uma pessoa está dentro da carroceria de uma carreta que se encontra em movimento retilíneo uniforme em uma estrada e esta carroceria é isolada acusticamente e é opaca. A consequência é que a pessoa não é capaz de ouvir e nem de enxergar o que se passa fora desta carroceria, e ela será incapaz de dizer se a carreta está ou não em movimento. A

carreta é um referencial inercial. Se então em um dado momento a carreta é forçada a alterar a sua trajetória na estrada para percorrer uma curva circular, a pessoa, em seu referencial de dentro da carroceria, se sentirá “empurrada”. E como ela não sabe que a carreta está em movimento, poderá concluir que esse “empurrão” é devido a uma força que surgiu repentinamente. Mais ainda, se essa pessoa calcular essa força, concluirá que ela tem o mesmo módulo da força centrípeta, mas com sentido oposto a esta, ou seja, radialmente para fora da curva circular. A essa pseudo-força se dá o nome de força centrífuga.

O fato é que, para a pessoa ser capaz de percorrer a curva circular junto com a carreta, terá que se segurar com uma força no mínimo igual em módulo a  $m\omega^2 r$ , que fará o papel de força resultante centrípeta. Mas no referencial da pessoa, essa força que estará fazendo será para contrabalançar uma força que parece a estar “puxando” radialmente para fora. Mas, considerando o movimento relativo, não existe essa força que a puxa realmente. A pessoa simplesmente está lutando contra a inércia de seu corpo que tem a tendência natural de se mover em linha reta.

Pensemos agora na rotação da Terra, definindo o planeta como uma esfera que se comporta como um corpo elástico. Todos os elementos infinitesimais de massa  $dm$  que compõe o planeta e que não estejam girando sobre o eixo de rotação ou nos pólos sul e norte (que possuem raio  $r = 0$ ) sentirão a ação de forças centrífugas, radialmente para fora, sob o ponto de vista dos seus referenciais. E como a velocidade angular constante  $\omega$  é a mesma em todos os pontos da Terra, quanto maior for o raio  $r$  de giro de um elemento de massa  $dm$ , maior será a força centrífuga que age sobre ele. Dividindo agora a Terra em seções circulares, a conclusão é a de que vários elementos de massa que se encontram em seções circulares próximas do equador terrestre ou na seção circular do equador estarão sobre a ação de maiores forças centrífugas, pelo maior raio dessas seções. A consequência final disso é o achatamento dos pólos e o estiramento do equador da Terra. O raio do equador terrestre tem o tamanho

aproximado de  $R_{Te}=6378 \text{ km}$  e o raio dos pólos  $R_{Tp} =6356 \text{ km}$ . Esse é um dos motivos da aceleração resultante nos pólos ser maior que em áreas da superfície terrestre próximas ao equador, pois quanto maior a distância  $r$  em relação ao centro de massa de um corpo, menor será a ação de seu campo gravitacional.

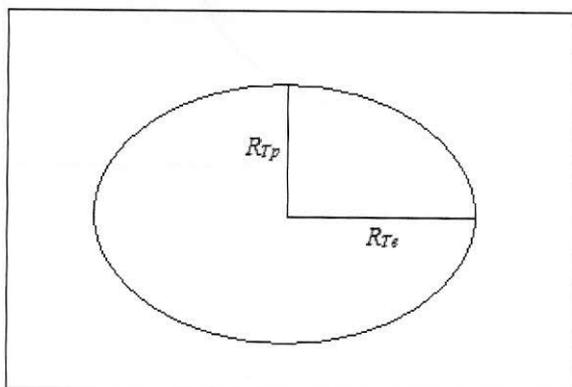


Figura 25 – Comparação entre os raios equatorial e polar da Terra

Um outro motivo é porque o vetor aceleração  $\mathbf{g}$  resultante em um ponto  $P$  arbitrário na superfície da Terra será a soma vetorial entre a aceleração centrífuga  $\mathbf{a}_C$  e a aceleração gravitacional da Terra, agora chamada de  $\mathbf{g}_T$  (figura 26). Em pontos da superfície próximos ao equador terrestre, a aceleração centrífuga  $\mathbf{a}_C$  será máxima e com isso a aceleração resultante  $\mathbf{g}$  será mínima. Nos pólos, não haverá aceleração centrífuga agindo de forma a diminuir o módulo de  $\mathbf{g}$ , que neste local equivale então ao módulo de  $\mathbf{g}_T$ .

A consequência é a de que, enquanto nos pólos aproximadamente  $\|\mathbf{g}\| = 9,83 \text{ m/s}^2$ , no equador este valor se aproxima de  $\|\mathbf{g}\| = 9,78 \text{ m/s}^2$ .

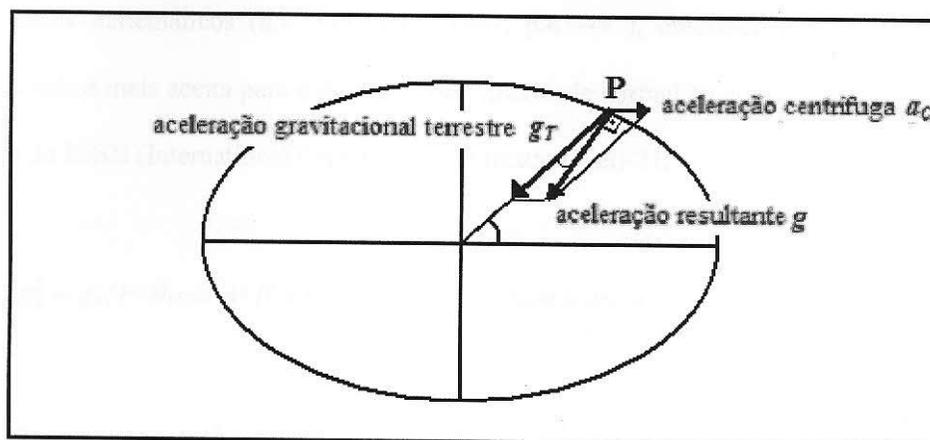


Figura 26 – Aceleração resultante em um ponto  $P$  arbitrário na superfície da Terra.

## 5.4 O esferóide e o geóide

### 5.4.1 O esferóide

O Esferóide Internacional de Referência é a figura matemática tridimensional que busca a melhor aproximação do formato elipsoidal da Terra. O esferóide busca representar o melhor possível a superfície real do nível médio dos oceanos e desconsidera a óbvia maior altura da superfície da Terra nos continentes. A conclusão é que as linhas virtuais do esferóide ficam geralmente abaixo da superfície real do planeta nos continentes. Se a superfície da Terra fosse totalmente líquida, sem os continentes, o esferóide representaria uma superfície equipotencial. Com a presença dos continentes, o esferóide é uma aproximação razoável de uma superfície equipotencial somente nos oceanos.

Considerando o esferóide uma superfície equipotencial, teremos que a direção da aceleração resultante  $g$  será sempre perpendicular a essa superfície. Em 1930, a União Internacional de Geodésia e Geofísica adotou uma aproximação para  $g$ . Em 1967, essa fórmula foi superada pela fórmula do GRS1967 (q.v. TELFORD *et al.*, 1990, p.10). Por meio

de cálculos matemáticos (q.v. LOWRIE, 1997, p.47-49 ), obteve-se a aproximação hoje considerada a mais aceita para o módulo dessa gravidade normal ao elipsóide, de 1971, obtida através do IGSN (International Gravity Standardization Net)-71.

$$\|g\| = g_e (1 + \beta_1 \text{sen}^2 \phi + \beta_2 \text{sen}^2 2\phi) = g_T \text{ (gravidade teórica) } , \quad (5.22)$$

onde  $\beta_1 = 5,3024 \times 10^{-3}$ ,  $\beta_2 = -5,87 \times 10^{-6}$ ,  $\phi$  é o ângulo de latitude geográfica (q.v. LOWRIE, 1997, p.49) em relação ao equador e  $g_e = 9,780318 \text{ m/s}^2$  é o valor do módulo da gravidade  $g$  no equador.

Essa fórmula leva em consideração os efeitos, na gravidade resultante, da figura elipsoidal da Terra e das acelerações centrífugas em sua superfície.

#### 5.4.2 O geóide

A superfície que é realmente equipotencial, tanto nos oceanos como nos continentes, é chamada de geóide. Essa superfície inclusive acompanha as depressões e estufamentos – que ocorrem devido à influência da rocha do embasamento- existentes nos oceanos. Por representar o nível médio dos oceanos, o Esferóide Internacional de Referência não acompanha essas “ondulações” dos oceanos. No Oceano Índico próximo ao sul da Índia, por exemplo, o nível da água, e conseqüentemente o nível do geóide, estão a mais de 100 metros abaixo do nível do esferóide de referência. Já no Oceano Pacífico ao norte da Austrália, esse nível da água está a mais de 70 metros acima do esferóide (q.v. LOWRIE, 1997, p.51).

No encontro entre oceanos e continentes, o nível das massas d’água está geralmente acima da elevação da água nos oceanos. Esse fato ocorre porque nestes locais as grandes

porções de massa dos continentes geram uma atração gravitacional nas massas d'água próximas. Essa atração gravitacional, quando somada vetorialmente com a força gravitacional do planeta Terra, dá uma força resultante que tem como consequência a elevação do nível das massas d'água. Se pudéssemos traçar canais que cortassem os continentes de forma a interligar os oceanos, veríamos que o nível da água desses canais acompanharia a superfície do geóide.

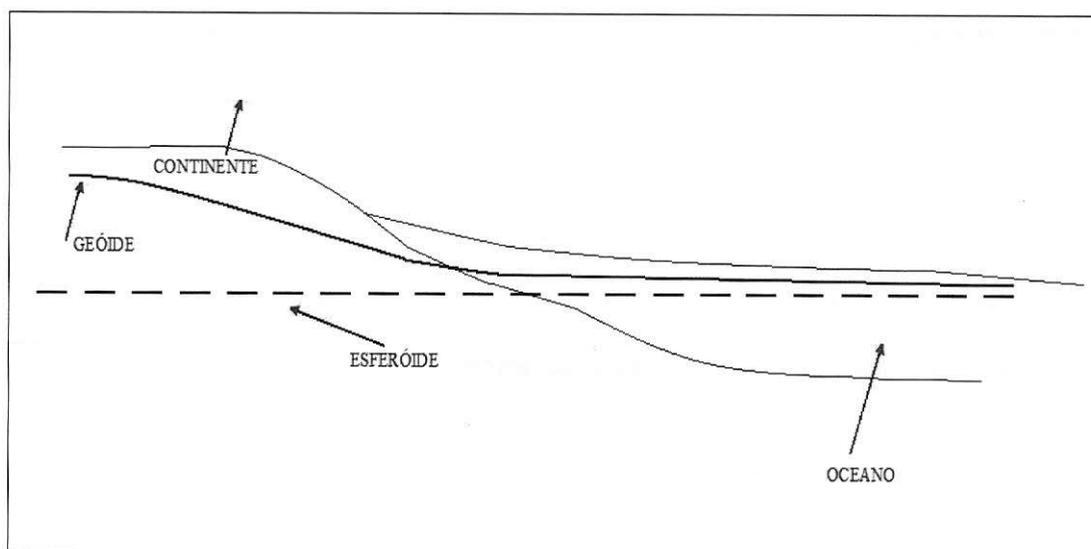


Figura 27– *Contraste entre o esferóide e o geóide*

## 5.5 Medições relacionadas à aceleração resultante $g$

### 5.5.1 Introdução

Já se comentou neste texto sobre valores teóricos, médios, aproximados e calculados do módulo da aceleração resultante  $g$ . Mencionou-se também que o cálculo de minúsculas variações no campo gravitacional resultante em um dado local de interesse é fundamental na Gravimetria.

As medições de  $g$  podem ser de dois tipos: medições da magnitude absoluta de componentes de interesse do vetor resultante  $g$  ou então medições relativas, que medem a diferença entre a gravidade de um local para o outro, conhecendo-se o valor da magnitude absoluta de  $g$  de um dos locais.

Em Gravimetria, medições absolutas de componentes de  $g$  são geralmente efetuadas em algumas dadas instalações fixas.

Ainda em Gravimetria, é importante conseguir calcular variações do campo gravitacional devido a uma porção de massa de interesse em um dado terreno. Por serem essas variações da ordem de 0.01 mGal, é difícil elaborar-se um instrumento de medições absolutas que consiga detectar essas variações e ser portátil e viável para ser utilizado com praticidade em qualquer local. Levantamentos gravimétricos em um terreno geralmente utilizam instrumentos portáteis chamados de gravímetros, que detectam mudanças na componente  $z$  de  $g$  relativas a um ou mais locais de referência, como estações. Estes equipamentos podem ser extremamente sensíveis a variações no campo gravitacional resultante.

### 5.5.2 As estações de medida de $g$

Segundo informações retiradas da Wikipedia, *“Estação gravimétrica é o ponto no qual se determina a aceleração de gravidade, a posição geográfica, a altitude ortométrica e outros dados de interesse à representação do campo de gravidade, dependendo do...”* instrumento *“... usado na medição, as estações... são classificadas em estações... absolutas... e estações gravimétricas relativas”* (que utiliza medidas com gravímetros).

Estações relativas podem então medir as diferenças de  $g$  relativas às estações absolutas, ou seja, estações que medem valores absolutos de  $g$  vêm a servir de referência para as estações

relativas. “As estações relativas, segundo os objetivos”, “são classificadas em estações básicas e estações de densificação”. “As estações básicas possuem alta precisão, sobretudo na aceleração gravidade, e têm como objetivo o apoio gravimétrico nos levantamentos de densificação. As estações de densificação, implantadas em pequenas ou grandes regiões, visam o cálculo de anomalias gravimétricas”.

Será citado neste texto o exemplo das estações de leitura de  $g$  do Brasil. “No Brasil, existem atualmente cerca de 10 estações absolutas de controle (Gemael et al, 1989), aproximadamente 500 estações básicas relativas (Blitzkow & Sá, 1978; ON, 1987) e algumas dezenas de milhares de estações de densificação usadas na Representação de anomalias gravimétricas (Sá et al, 1992)”.

O espaçamento entre as estações em um dado levantamento dependerá de quais são as feições geológicas ou estruturas de interesse. Geralmente, as estações são espaçadas de maneira a formar uma malha retangular, mas cada levantamento é analisado de forma diferente.

### 5.5.3 Medidas absolutas

Os métodos mais utilizados atualmente para medições absolutas de  $g$  são o método *free-fall* e o método *rise-and-fall*.

No método *free-fall*, a leitura de  $g$  é obtida observando-se objetos em queda livre. Se um objeto inicia em um tempo  $t_0=0$  uma queda livre partindo de uma dada posição inicial  $x_0$  e com velocidade inicial  $v_0$ , a equação de movimento que dá a nova posição  $x$  do objeto após um tempo  $t > t_0$  de queda é:

$$x = x_0 + v_0 t + 1/2 g t^2 \quad (5.23)$$

O valor do módulo de  $g$ , definido na equação acima como  $g$ , é obtido então se registrando o mais precisamente possível diferentes posições  $x$  em tempos  $t$  do objeto em queda em uma câmara com vácuo, para minimizar os efeitos da resistência do ar. O módulo de  $g$  é calculado após ajustar em uma função quadrática esses registros de posição e tempo. Em experimentos modernos, as posições  $x$  de queda do objeto têm sido medidas muito precisamente através de um Interferômetro de Michelson (q.v. LOWRIE, 1997, p.56-57).

Na versão original do método *rise-and-fall*, uma esfera de vidro era atirada verticalmente para cima e descrevia em seguida uma queda livre pelo mesmo caminho. Ao longo desse caminho dois equipamentos, definidos neste texto como 1 e 2, em diferentes alturas registravam o tempo de passagem da esfera tanto na fase de ascensão quanto na fase de queda livre. A distância  $h$  entre os equipamentos era medida precisamente através de interferometria óptica. Define-se então como  $T_1$  o tempo que a esfera leva para, ao passar pelo equipamento 1 durante a ascensão, retornar durante a este mesmo equipamento na queda livre. Define-se como  $t_1 = T_1/2$  o intervalo de tempo entre a passagem da esfera pelo equipamento 1 durante a ascensão até o apogeu. A distância percorrida durante  $t_1$  é definida como  $x_1$ . Analogamente, para o equipamento 2 teremos  $T_2$ ,  $t_2$  e  $x_2$ . Teremos então as relações abaixo:

$$z_1 = \frac{1}{2}g\left(\frac{T_1}{2}\right)^2 \quad \text{e} \quad z_2 = \frac{1}{2}g\left(\frac{T_2}{2}\right)^2 \quad (5.24)$$

Teremos também que a separação entre os equipamentos 1 e 2 será

$$h = z_1 - z_2 = \frac{1}{8}g(T_1^2 - T_2^2) \quad (5.25)$$

Logo, o módulo de  $g$ , definido novamente como  $g$ , pode ser calculado através da relação abaixo:

$$g = \frac{8h}{(T_1^2 - T_2^2)} \quad (5.26)$$

Em uma variação moderna deste método, um interferômetro de Michelson é utilizado tal como no método *free-fall*, obtendo resultados similares a este último.

#### 5.5.4 Medidas relativas

Medições relativas de gravidade podem ser feitas de várias maneiras. Três tipos de instrumentos têm sido utilizados: a balança de torção, o pêndulo e o gravímetro (ou medidor de gravidade). O último citado é o instrumento utilizado atualmente para prospecção, os outros tendo somente interesse histórico. Ou, segundo TELFORD *et al.*(1990), "*Relative gravity measurements may be made in various ways. Three types of instruments have been used: the torsion balance, the pendulum and the gravimeter (or gravity meter). The latter is the sole instrument now used for prospecting, the others having only historical interest.*".

Dos variados tipos de gravímetros que foram desenvolvidos para medir a diferença de gravidade entre dois pontos quaisquer, são destaque o Lacoste & Romberg e o Worden, sendo o primeiro o mais utilizado atualmente (q.v. TELFORD *et al.*,1990, p.21-23).

Estes gravímetros utilizam o balanceamento de uma massa suspensa em uma mola. Devido à ação de uma força gravitacional, a mola se alonga. Diferentes campos gravitacionais em diferentes locais também alongarão a mola em diferentes quantidades. Através das variações de alongamentos da mola, obtém-se as diferenças do módulo de  $g$  em cada local.

Os gravímetros também podem ser classificados em dois tipos: os do tipo estáticos e os do tipo astáticos. Tipo estável, segundo BUONORA (2006): *“o tipo estável usa um sistema que fornece um alto grau de amplificação mecânica ou ótica, de forma que a mudança na posição de uma massa ou propriedade associada, resultante da mudança da gravidade, pode ser medida diretamente;”*. Tipo instável, segundo BUONORA(2006): *“o tipo instável usa um sistema móvel no limiar do equilíbrio instável, de forma que pequenas variações na gravidade produzem deslocamentos relativamente altos no sistema.”* BUNUORA(2006) faz ainda uma comparação entre estes dois tipos de gravímetros: *“Normalmente, os gravímetros do tipo estável fornecem leituras que variam linearmente sob grande leque de variação. Por outro lado, os do tipo instável possuem um leque mais estreito de variação e têm resposta não-linear; portanto, neles, sua leitura é feita medindo-se a variação de uma força de anulação ou de balanceamento necessária para trazer o braço móvel do sistema para uma posição fixa de referência”*.

## 5.6 Correções nos valores obtidos para $g$

### 5.6.1 Introdução

As correções aplicadas em cima dos valores de  $g$  medidos nas estações ou nos gravímetros têm como finalidade eliminar todos os motivos já esperados de variações nos valores obtidos para  $g$  de forma que toda e qualquer diferença entre as leituras de  $g$  das estações ou gravímetros após essas correções sejam unicamente devido a anomalias gravimétricas de subsuperfície.

### 5.6.2 CORREÇÕES

#### 5.6.2.1 Correção de altitude

## 5.6.2 O DATUM

O DATUM, também chamado de Superfície de Referência, é uma superfície horizontal virtual e de altitude constante escolhida para a qual todas as estações que medem a aceleração  $g$  de um dado terreno são calibradas. Após o nivelamento neste DATUM das estações de medida, e após todas as correções teóricas, que serão relatadas a seguir, em cima das medições de  $g$  das estações, as variações de leitura de  $g$  que porventura ocorrerem entre as estações serão unicamente por causa de anomalias gravimétricas.

Particularmente, as correções de altitude, ou *free-air*, nivelam as estações na altitude do DATUM escolhido. Na figura 28, os valores para as correções de altitude para nivelamento ao DATUM das estações gravimétricas A, B e C são de  $H_A$ ,  $H_B$  e  $H_C$ , respectivamente.

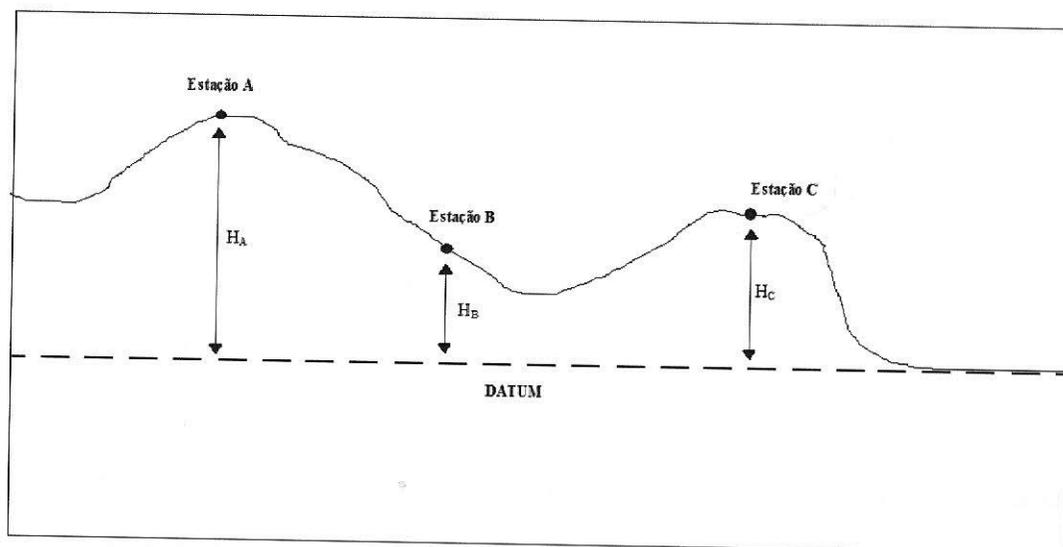


Figura 28– Deslocamento das estações A, B e C ao DATUM

## 5.6.3 CORREÇÕES

### 5.6.3.1 Correção de altitude ou free-air

A aceleração gravitacional produzida pela Terra decai com o quadrado da distância entre o seu centro de massa e um ponto arbitrário  $P$ . Aproximando a Terra ao Esferóide de Referência, a aceleração gravitacional terrestre em um ponto  $P$  no nível do mar pode ser dada aproximadamente pela equação 5.3b. Entretanto, em um ponto  $Q$  a uma altitude  $H$  do nível do mar, a distância entre esse ponto e o centro de massa da Terra será agora  $[R_T+H]$ . A conclusão é que a gravidade neste ponto será menor do que na superfície do mar, ou seja, a aceleração gravitacional resultante  $g$  varia com a altitude.

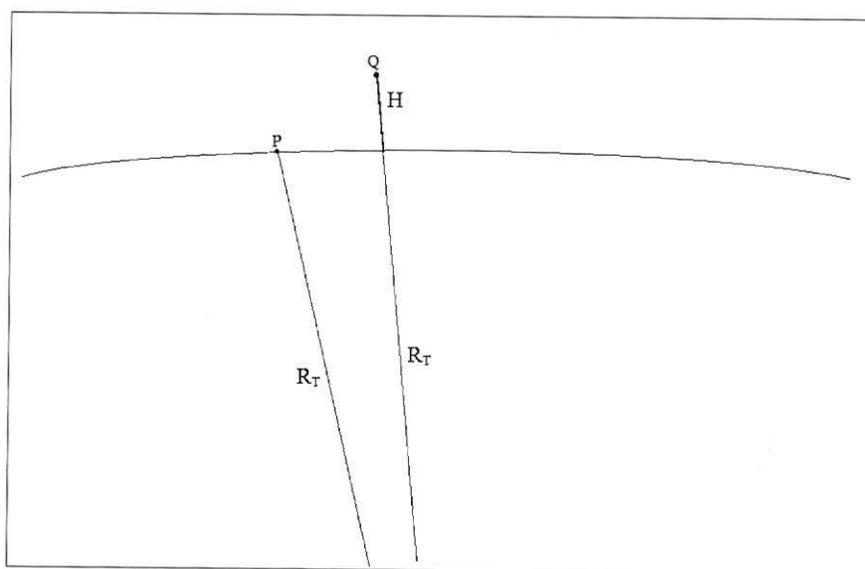


Figura 29 – Distância em relação ao centro da Terra para os pontos  $P$  e  $Q$

Para obter a equação que calcula o módulo da variação  $V_{AL}$  da aceleração resultante  $g$  em função da altitude, basta derivar o módulo da equação 5.3b em função da altitude  $H$  para um raio  $r = [R_T+H]$  arbitrário:

$$V_{AL} = \frac{d\|g\|}{dH} = \frac{d}{dH} G [M_T/(R_T+H)^2] = -2G [M_T/(R_T+H)^3] \quad (5.27a)$$

Considerando que  $H \ll R_T$ , a equação 5.23a se reduz a

$$V_{AL} = -2G [M_T / (R_T)^3] \quad (5.27b)$$

Considerando  $M_T = 5,98 \times 10^{24} \text{ kg}$  e  $R_T = 6371 \text{ km}$ , teremos que  $V_{AL} = -0,309 \text{ mGal/m}$ . A interpretação é que, para cada metro acima da altitude em relação à superfície do Esferóide de Referência, uma leitura do valor do módulo de  $g$  tem que ser reduzido em  $0,309 \text{ mGal}$ . É importante ressaltar que essa quantidade é válida para altitudes bem menores quando comparadas com o raio da Terra.

### 5.6.3.2 Correção de latitude

Aproximando o planeta Terra ao Esferóide de Referência, teremos que o módulo da aceleração resultante  $g$  a uma dada latitude qualquer é dada pela equação 5.22. Logo, a variação  $V_{LA}$  de  $g$  com a altitude é obtida diferenciando-se a equação 5.22 em relação ao ângulo de latitude  $\phi$ :

$$V_{LA} = \frac{d}{d\phi} [g_e (1 + \beta_1 \text{sen}^2 \phi + \beta_2 \text{sen}^2 2\phi)] \quad (5.28a)$$

$$V_{LA} = g_e (\beta_1 2 \text{sen} \phi \cdot \cos \phi + \beta_2 2 \text{sen} 2\phi \cdot \cos 4\phi) = g_e (\beta_1 \text{sen} 2\phi + \beta_2 2 \text{sen} 4\phi) \quad (5.28b)$$

Pode-se negligenciar o termo que possui  $\beta_2$ , por ser bem menor que o termo que possui  $\beta_1$ . Com isso, teremos que

$$V_{LA} = g_e(\beta_1 \text{sen} 2\phi) \quad (5.28c)$$

Essa variação é dada em radianos. A variação de latitude de  $g$  dada por quilômetro é

$$V_{LA} = \frac{1}{R} \frac{d}{d\phi} [g_e(1 + \beta_1 \text{sen}^2 \phi + \beta_2 \text{sen}^2 2\phi)] \quad (5.28d)$$

Para um raio  $R = R_T = 6371 \text{ km}$  constante, teremos finalmente que a variação de latitude de  $g$  por quilômetro é

$$V_{LA} = g_e(\beta_1 \text{sen} 2\phi) / R_T \quad (5.28e)$$

Com isso,  $V_{LA} = 0,8140 \text{ sen} 2\phi \text{ mGal}$  por quilômetro deslocado, em deslocamentos no sentido norte-sul. Analisando a fórmula 5.24, nota-se que a variação de  $g$  com a latitude é máxima para um ângulo  $\phi = \pi/4$ .

### 5.6.3.3 Correções de terreno

As correções de terreno  $V_{TRN}$  servem para eliminar o efeito gravitacional de porções de massa salientes como montanhas ou de depressões que agem em uma dada estação próxima destinada a ler valores da aceleração resultante  $g$ . O efeito gravitacional de porções de massa já foi discutido superficialmente na subseção 5.4.2.

Suponha que existe uma depressão a Oeste de uma estação que está em um dado ponto Q ao nível do Datum da situação. A ausência de uma massa M, que será definida como  $-M$  (figura 30), nessa depressão diminui a leitura de  $g$  na estação da mesma forma que um dado

arranjo de uma porção de massa  $M$ , como uma montanha, que se encontrasse a Leste da estação, poderia diminuir. Portanto, a ausência de uma massa  $M$  na depressão altera a força gravitacional resultante em  $Q$  da mesma forma que a montanha de massa  $M$  alteraria.

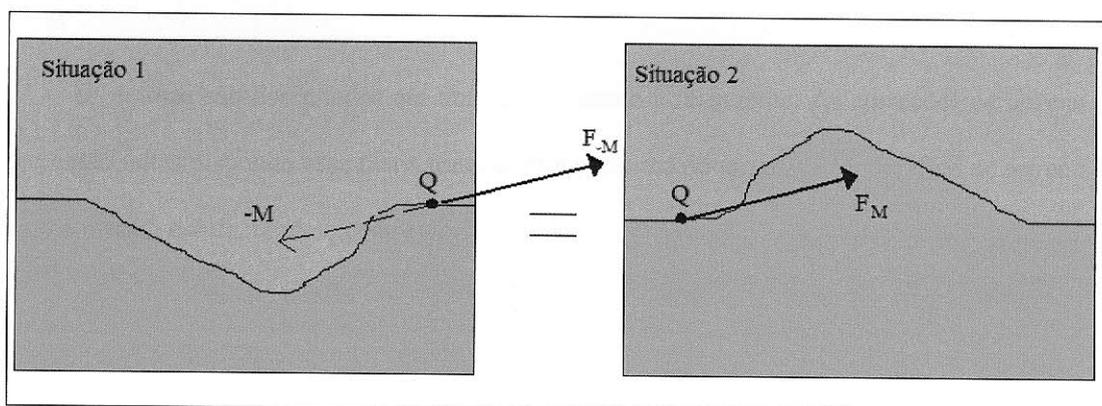


Figura 30 – As situações 1 e 2 são análogas e  $F_M = F_{-M}$ , onde  $F_M$  é a força gravitacional gerada pela montanha de massa  $M$  da situação 2 e  $F_{-M}$  é o quanto se modifica a força gravitacional resultante no ponto  $Q$  devido à depressão da situação 1.

Conclui-se que as saliências e depressões do terreno sempre reduzem o módulo da componente  $g_z$  de  $\mathbf{g}$  resultante. A leitura dos gravímetros, que lêem exatamente essa componente, precisa ser então corrigida devido a esse efeito de terreno. Após essa correção, o valor de  $g_z$  sempre aumenta e é como se o terreno ficasse plano ao redor da estação de medida.

Para uma análise quantitativa, um conhecimento aprofundado da topografia do terreno ao redor da estação de medida é necessário. E como a topografia ao redor de cada estação é diferente, é necessária uma análise individual para cada uma delas.

A análise quantitativa das correções de terreno parte da equação 5.17 considerando densidades  $\rho$  constantes, simetria cilíndrica em torno do ponto onde está uma dada estação e dividindo em pequenos corpos tridimensionais as saliências ou depressões à volta da estação (q.v. LOWRIE, 1997, p.60-61).

Na prática, as correções de terreno são feitas combinando o resultado dos cálculos quantitativos mencionados no parágrafo anterior a um mapa de correções de terreno. Este

mapa é composto de diversos setores que, somados, formam um círculo (q.v. LOWRIE, 1995, p.61). Os cálculos quantitativos são aplicados aos setores que são então tabelados. Essas tabelas de correções podem ser encontradas em diversos livros (q.v. TELFORD *et al.*, 1990, p.14).

Os setores são desenhados em um papel-plástico transparente. As correções de terreno são então feitas dispondo esse mapa transparente por cima de um mapa topográfico do terreno com a mesma escala, tendo o centro do círculo coincidindo com a estação desejada.

As correções de terreno são geralmente utilizadas para o caso em que a diferença topográfica (ou diferença de altitude ) entre um dado setor e a estação de medida de  $g$  é maior que 5% da distância entre o centro deste setor e esta estação de medida.

#### 5.6.3.4 A correção Bouguer

Após as correções de terreno, o terreno ao redor de uma estação de leitura de  $g$  se comporta como se fosse plano, sem depressões nem saliências.

A correção Bouguer visa eliminar o efeito gravitacional da camada planificada (pelas correções de terreno) de material rochoso que está entre a estação e o DATUM. A espessura desta camada é definida neste texto como espessura  $H$ . É importante ressaltar que também será  $H$  a diferença de altitude da estação em relação ao DATUM, logo,  $H$  será adicionalmente utilizado na correção de altitude.

Analisemos o caso de uma estação que não é subterrânea. Para a transposição da estação a um DATUM escolhido que está a uma altitude menor do que a altitude da estação, o efeito gravitacional da camada planificada precisa ser subtraído da leitura de  $g$ . Para a transposição da estação a um DATUM escolhido que está a uma altitude maior do que a altitude da estação, a correção Bouguer inexistente.

Analisemos agora uma estação subterrânea. Para a transposição da estação a um DATUM escolhido que está a uma altitude maior do que a altitude da estação, o efeito gravitacional da camada de material rochoso entre a estação e o DATUM precisa ser somado à leitura de  $g$ . Para a transposição da estação a um DATUM escolhido que está a uma altitude menor do que a altitude da estação, dois procedimentos precisam ser tomados. Enquanto o efeito gravitacional da camada de material rochoso que está entre a superfície do terreno e a estação precisa ser somado à leitura de  $g$ , o efeito gravitacional da camada de material rochoso que está entre a estação e o DATUM é subtraído da leitura de  $g$  (figura 31).

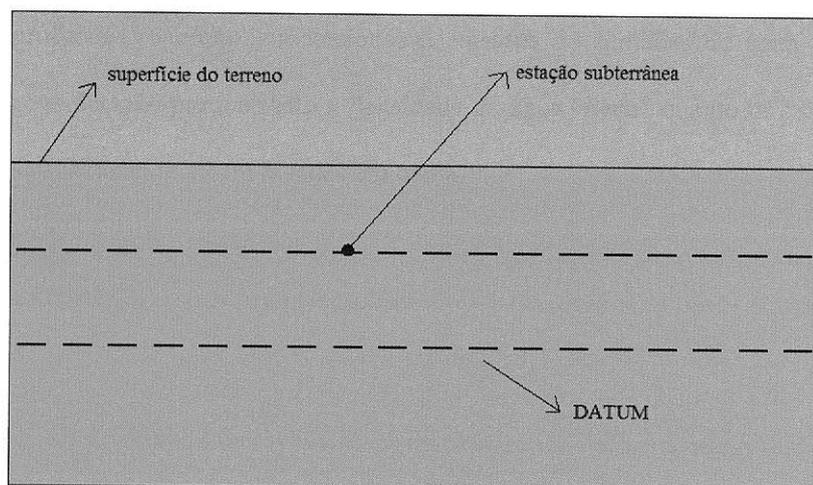


Figura 31- Estação Subterrânea

Analisar-se-á agora quantitativamente a correção Bouguer para o caso de uma estação não-subterrânea cuja Superfície de Referência se encontra a uma altitude menor do que a estação. Partindo-se da equação 5.17, pode deduzir-se o efeito gravitacional  $V_{\text{disco}}$  no centro de um disco de raio  $r$ , espessura  $H$  e com material rochoso de densidade  $\rho$  aproximadamente constante:

$$V_{\text{disco}} = 2\pi G\rho \left[ h - \left( \sqrt{r^2 + h^2} - r \right) \right] \quad (5.29)$$

Impondo que a estação está situada no centro desse disco, então a correção Bouguer será efetuada subtraindo-se o efeito gravitacional da equação 5.25 da leitura de  $g$  na estação. Considerando uma situação comum em que  $r \gg h$ , a correção Bouguer efetuada na leitura de  $g$  da estação será:

$$V_{Bouguer} = 2\pi G\rho h = 0.0419 \times 10^{-3} \rho \text{ mGal /m} \quad (5.30)$$

Para o caso de levantamentos gravimétricos nos oceanos ou em lagos de água profundas, o efeito gravitacional de massas de camadas de água tem que ser levado em consideração porque tanto a densidade da água “doce” quanto da “salgada” já são grandes o suficiente para serem levadas em conta.

#### 5.6.3.5 Correção do Efeito Eötvös

Já se sabe que a velocidade de rotação da Terra, que aqui será agora definida como  $v_T$ , modifica a aceleração resultante  $g$  em um dado corpo que está imóvel em sua superfície. É também fato que velocidade de rotação da Terra é na direção oeste-leste. Se um corpo começa então a se mover com uma velocidade  $v$  na mesma direção de rotação da Terra, a velocidade circular resultante do corpo será  $v_T + v$ , para a direção oeste-leste, ou seja, a força centrífuga sobre o corpo aumentará. Entretanto, se o corpo inicia um movimento com velocidade  $v$  agora na direção leste-oeste, a velocidade resultante do corpo será  $v_T - v$ , também para a direção oeste-leste. Com isso, a força centrífuga sobre o corpo diminuirá. No primeiro caso, a leitura da gravidade  $g$  sobre o corpo será menor do que quando o corpo estava imóvel. No segundo caso, a leitura de  $g$  será maior.

Deslocamentos no sentido norte-sul também criarão novas componentes de força centrífuga, que têm que ser adicionadas vetorialmente a deslocamentos no sentido leste-oeste. Esses são os casos do que se chama de Efeito Eötvös. A correção do Efeito Eötvös é dada por:

$$V_{\text{Eötvös}} = 4,04V \cos \phi \sin \alpha + 0,001211V^2 \text{ mGal} \quad (5.31)$$

Na equação acima,  $V$  é a velocidade do corpo em quilômetros por hora,  $\phi$  é ângulo da latitude à qual está o corpo e  $\alpha$  é o ângulo entre a direção do movimento do corpo e o Norte Geográfico. Em algumas situações, o Efeito Eötvös gera alterações em  $g$  muito maiores do que outros fatores.

#### 5.6.3.6 Correção de Maré

As variações de maré  $V_{Ma}$  são uma combinação de diferenças de efeitos gravitacionais que a Lua e o Sol exercem sobre a Terra. Esse efeito é percebido a olho nu nos oceanos. Todos já ouviram e muitos já viram marés altas e marés baixas nas praias. Essas marés são consequência da ação de forças gravitacionais do Sol e da Lua que atraem de formas diferentes as massas d'água do oceano.

Apesar da massa do Sol ser muito maior que a massa da Lua, ele está também muito mais distante da Terra do que nosso satélite natural. A consequência é que o efeito maré máximo do Sol sobre a Terra é um pouco menor do que a metade do efeito maré máximo da Lua sobre nosso planeta.

Os efeitos maré combinados do Sol e da Lua podem gerar acelerações na superfície terrestre de mais de 0.3 mGal. Por alterar a aceleração gravitacional resultante sobre locais da superfície da Terra, o efeito maré tem que ser levado em conta em Gravimetria, já que os

sensíveis instrumentos utilizados na atualidade em medidas gravimétricas são capazes de detectar diferenças em  $g$  da ordem de 0.01 mGal. Felizmente, o efeito maré é totalmente compreendido e seu efeito é capaz de ser previsto, tabelado e eliminado matematicamente em qualquer período ou local da Terra antes de iniciar-se um levantamento gravimétrico.

#### 5.6.3.7 Correções de Deriva

As variações de deriva  $V_{DE}$  são causadas pela influência da variação de temperatura sobre as molas dos gravímetros. Apesar de existirem sistemas de compensação que visam eliminar os efeitos da variação de temperatura, eles não são perfeitos. Além disso, há uma fadiga elástica na mola ao longo do tempo de uso. A consequência é a variação das leituras de  $g$  resultante dos gravímetros ao longo do dia, mesmo no caso em que estes estejam em uma estação fixa.

BUONORA(2006) comenta: “*O monitoramento para a correção de deriva é feito por repetição sistemática de leituras em estações reocupadas em intervalos de tempo que dependem da natureza do gravímetro*”. A deriva dos gravímetros do tipo LaCoste & Romberg, por exemplo, é baixíssima. Se não houvesse choques mecânicos acidentais durante o transporte desses gravímetros no campo, as estações não precisariam ser reocupadas.

As correções das variações de maré  $V_{Ma}$  e de deriva  $V_{DE}$  pelos instrumentos serão embutidos na correção de uma única variação,  $V_{MD} = V_{Ma} + V_{DE}$ .

#### 5.6.3.8 Correção isostática

As massas continentais encontram-se em equilíbrio isostático com o manto, e “flutuam como icebergs” sobre este, por terem menor densidade que materiais desse manto.

Se as massas topográficas se sobrepusessem numa crosta homogênea, as reduções de Bouguer removeriam as principais irregularidades do campo gravitacional. Em consequência disso, as anomalias de Bouguer seriam muito pequenas e oscilariam em torno de zero. Na prática, as anomalias de Bouguer são sistematicamente negativas nas zonas montanhosas, atingindo, em média  $-100$  mGal por cada 1000 metros de elevação. Os próprios desvios da vertical são menores do que o esperado. No século XIX, J.H. Pratt, nos Himalaias, calculou um valor de 28 mGal e obteve por observação apenas 5 mGal. Isto resulta de uma deficiência de massa debaixo das montanhas. Isto quer dizer que as massas topográficas montanhosas são, de alguma forma, compensadas.

Dois diferentes modelos, de Airy e de Pratt, são os mais utilizados atualmente para compreender o porquê da compensação das massas topográficas de montanhas. O *Modelo de Airy* foi desenvolvido matematicamente por Heiskanen, e postula que as diferenças altitude topográfica são compensadas por variações na espessura da crosta. O *Modelo de Pratt* foi desenvolvido matematicamente por Hayford, e postula que as diferenças altitude topográfica são compensadas por variações de densidade (laterais) da rocha que constitui a litosfera. (q.v. LOWRIE, p.307-310). De qualquer forma, há um consenso de que o modelo de Airy é o correto.

Para levantamentos gravimétricos em pequena escala, a correção isostática não costuma ser muito aplicada, mas em larga escala pode ser levada em conta.

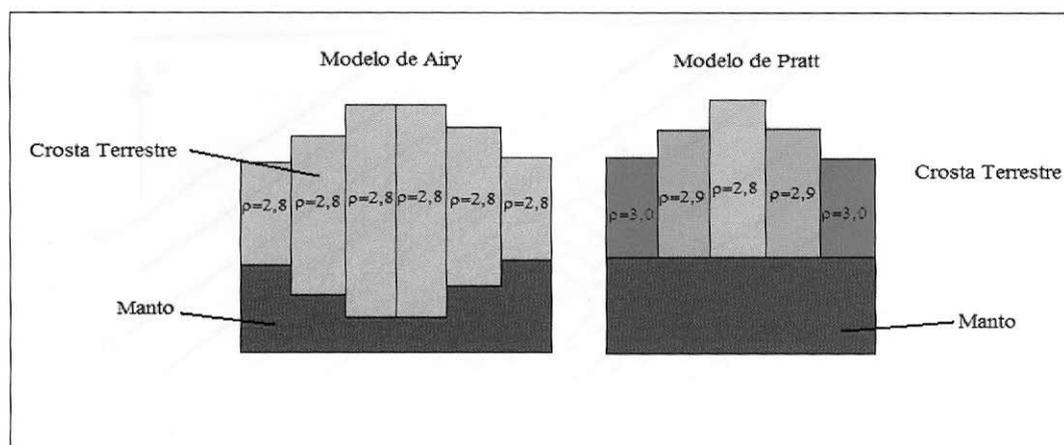


Figura 32 – Isostasia, onde  $\rho$  é dado em  $\text{g/cm}^3$

## 5.8 Anomalias Gravimétricas

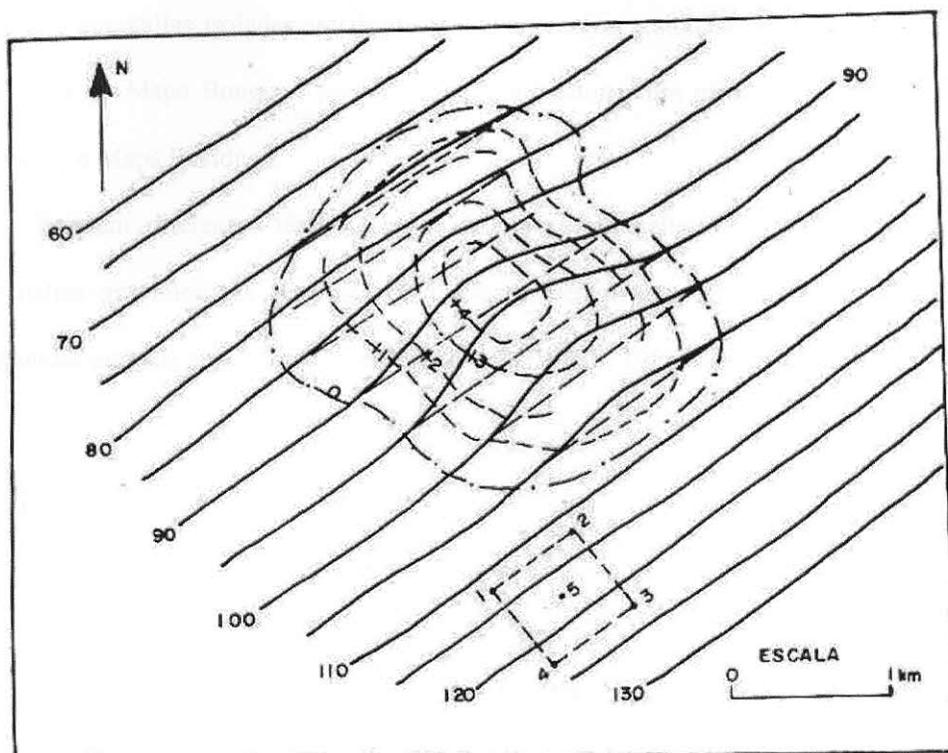
### 5.8.1 O Mapa Bouguer

Suponha que se escolhe um DATUM, como o Elipsóide de Referência, para várias estações não-subterrâneas que lêem  $g$ , e que estão próximas umas das outras em um terreno, sendo este não muito extenso, com isso a correção isostática não sendo considerada.

Depois de aplicadas todas as correções nas leituras de  $g$  das estações e estando estas já reduzidas ao nível do DATUM, o que restar das variações de leitura de  $g$  entre cada estação e a gravidade teórica  $g_T$  será então uma anomalia gravimétrica  $A_G$ . Em termos numéricos, teremos:

$$A_G = g_{obs} \pm V_{AL} + V_{LA} + V_{TRN} - V_{Bouguer} \pm V_{MD} - g_T \quad (5.32)$$

O mapa de contorno de iguais valores das leituras corrigidas de  $g$  é chamado de Mapa Bouguer (figura 33). Cada contorno é chamado também de uma isogálica, por conter anomalias gravimétricas de mesmo valores em Gal.



Mapa Bouguer  
 Contornos em cmgal  
 intervalo: 5 cmgal ———  
 Mapa Residual

Figura 33 – Mapa Bouguer  
 Fonte: FERNANDES(1984)

Na figura 33, podem observar-se duas tendências. Isogálicas mais suaves e graduais que variam de 5 em 5cmGal e algumas isogálicas com contornos mais próximos. Segundo FERNANDES(2006), “Em mapas que cobrem uma extensa área, a partir de dezenas de  $\text{km}^2$ , as variações graduais correspondem às chamadas anomalias regionais, que se correlacionam, muitas vezes, a mudanças laterais contínuas de densidade das rochas ou a mudança progressiva de profundidades ou espessuras, ou, ainda, a ambos efeitos combinados. Interessa, na maioria dos problemas de Prospecção Gravimétrica, remover-se as anomalias graduais (ou regionais) de modo a se destacarem as anomalias isoladas”.

As anomalias isoladas são chamadas de anomalias residuais. Ao remover as anomalias regionais do Mapa Bouguer, pode-se então confeccionar um novo mapa com as anomalias isoladas, o Mapa Residual.

Existem diferentes técnicas para separar as anomalias gravimétricas regionais das anomalias gravimétricas residuais de interesse, sejam estas anomalias de camadas mais profundas ou mais próximas à superfície (q.v. LOWRIE, 1997, p.66-70).

## **5.9 Interpretação dos dados gravimétricos**

### **5.9.1 Método direto**

Após a aquisição dos dados gravimétricos, seja por levantamentos terrestres, marítimos ou aéreos (q.v. TELFORD *et al.*, p.23-26), é necessário interpretar esses dados.

Tendo-se já um modelo estrutural inicial de uma dada área de interesse, baseando-se em conhecimentos geológicos da região e na experiência do intérprete, o modelo vai sendo modificado aos poucos de forma a dar uma resposta gravimétrica semelhante à obtida pelos dados. Quanto maior o conhecimento geológico da região, mais preciso ficará o modelo.

### **5.9.2 Método inverso**

No método inverso, um modelo inicial para a área de interesse também é proposto, mas o novo modelo, modificado de acordo com os dados obtidos, é calculado automaticamente por meio de algoritmos computacionais e equações matemáticas. Detalhes qualitativos e detalhes quantitativos aprofundados podem ser encontrados em BUONORA (2006).

## 5.10 Estudo de caso

### 5.10.1 Introdução

O estudo de caso foi baseado na aquisição e processamento de levantamento aerogravimétrico feito pela empresa Carson Services, Inc. para *Pérez Companc Del Peru* durante alguns meses de 2001. A área de levantamento, conforme já comentado, se situa na Bacia Marañon, no Peru, nos limites da transição desta bacia para a Bacia Oriente, no Equador.

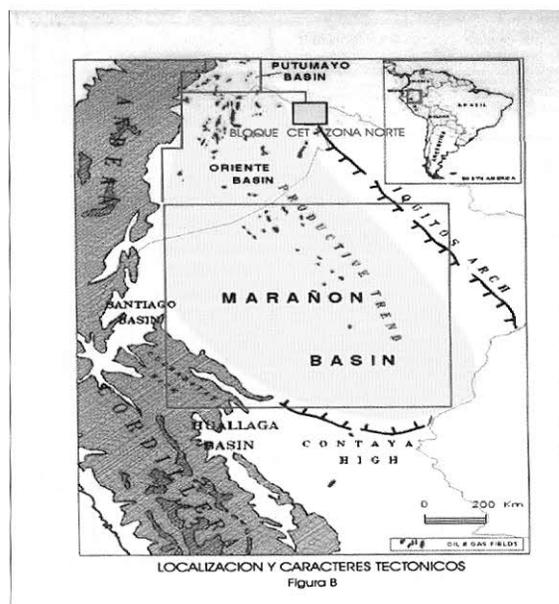


Figura 34 – Na figura, a área do levantamento está destacada no pequeno retângulo amarelo, no centro superior da figura.

Fonte:GRATEROL (2001)

A área visada para o levantamento era de difícil acesso, com floresta tropical amazônica densa e rios caudalosos. Por esse motivo, um levantamento aerogravimétrico surgiu como a melhor solução. Foram adquiridos 3782 quilômetros de dados gravimétricos em uma malha de voo irregular de  $3 \times 8 \text{ km}$ ,  $4 \times 8 \text{ km}$ ,  $12 \times 8 \text{ km}$  e  $16 \times 24 \text{ km}$ . O levantamento aéreo foi feito a uma altura de 1151 metros do nível do mar.

O intérprete dos dados gravimétricos adquiridos e processados foi Dr. Victor Graterol. Dr. Victor Graterol foi capaz de elaborar modelos geológicos iniciais que dessem uma forma básica ao topo do embasamento pré-cambriano da região (figura 36) e à base do Cretáceo (figura 37) utilizando 31 pontos de controle, os mesmos para ambos os modelos (Tabela 1) como referência, sendo estes pontos de controle poços produtores de óleo ou informações de linha sísmica 2D. As coordenadas destes pontos estão dispostas na projeção Universal Transverse Mercator (tabela 1). Victor baseou-se também em mapas geológicos existentes da região e através de sua própria experiência.

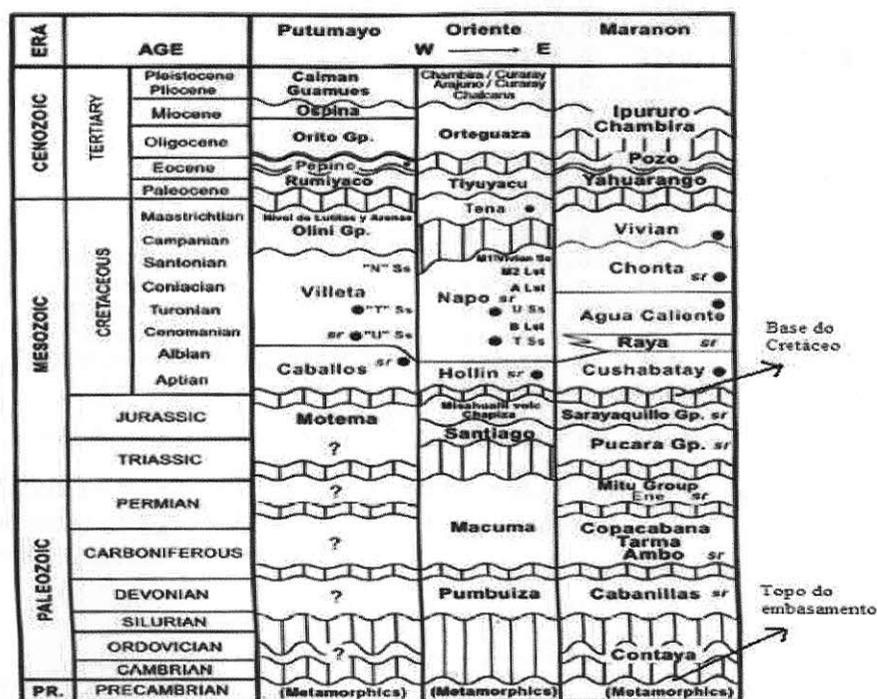


Figura 35— Separação geológica entre o topo do embasamento e a base do Cretáceo  
Fonte: GRATEROL (2001)

**PUNTOS DE CONTROL TOPE DEL BASAMENTO**

Punto	Coordenadas UTM		Tope	Resd.
	Este	Norte	(Al NMM)	
"Amoco-1"	363734.5	9899360.0	2884.0	-26.6
"Apaika-1x"	397186.9	9904226.0	2047.8	-18.9
"Nashino-1"	383438.0	9874216.0	2970.0	-27.4
"CI-15"	355425.1	9986398.0	3100.0	-28.6
"CI-17"	358523.9	9989770.0	2350.0	-21.7
"CI-21"	360779.9	9982444.0	2511.1	-23.1
"CI-24"	451600.0	9998900.0	1800.0	-16.6
"CI-33"	428000.0	9953000.0	2000.0	-18.4
"CI-35"	405000.0	9981200.0	2350.0	-21.7
"CI-37"	421300.0	9980000.0	1835.0	-16.9
"CI-39"	400000.0	9960000.0	2521.0	-23.2
"PC-1"	397400.0	9871214.0	4080.0	-37.6
"PC-2"	386100.0	9880100.0	3370.0	-31.1
"PC-3"	391515.0	9883100.0	3100.0	-28.6
"PC-4"	403438.0	9883220.0	2000.0	-18.4
"PC-5"	387439.0	9892218.0	2740.0	-25.3
"PC-6"	402439.0	9892204.0	2100.0	-19.4
"PC-7"	380438.0	9913215.0	2580.0	-23.8
"PC-8"	410442.0	9913217.0	1980.0	-18.3
"HOY-1"	529691.0	9838675.0	1000.0	-9.2
"HOY-2"	558914.0	9888113.0	1350.0	-12.4
"Paiche-65-37-1X"	457534.0	9835274.0	1850.0	-17.1
"Obe-1X"	401436.0	9871214.0	2037.0	-18.8
"Ishpingo-X-1"	427738.0	9879004.0	1616.0	-14.9
"Tiputini-1M"	437516.0	9908269.0	1500.0	-13.8
"Payacocha-1"	386368.2	9963204.0	2316.0	-21.3
"SanRoque-1"	358919.9	9966507.0	2727.0	-25.1
"SanRoque-2"	365200.0	9958580.0	2750.0	-25.3
"Yuturi-1"	379370.0	9934910.0	2410.0	-22.2
"Paujil-1"	403315.0	9946573.0	2099.0	-19.3
"Tambococha-1"	432985.8	9898718.0	1700.0	-15.7

Tabela 1- Na segunda e terceira colunas, tem-se as coordenadas dos pontos de controle na projeção cartográfica de Universal Transverse Mercator

Fonte:GRATEROL (2001)

### 5.10.2 Objetivos

A intenção principal deste estudo de caso foi elaborar modelos geológicos mais refinados de topo estrutural para o embasamento cristalino do Pré-Cambriano e para a base do Cretáceo, determinando falhas regionais e locais, tendências e outros elementos de interesse na exploração de hidrocarbonetos. Desejava-se também, além de outras coisas, integrar dados

obtidos por antigos levantamentos aéreos pela empresa *Pérez Companç Del Equador* com os dados deste levantamento.

### 5.10.3 Interpretação dos dados gravimétricos

Os dados gravimétricos da área de interesse foram obtidos através de um aerolevanteamento. Conforme já comentado na seção 5.8.1, ao interpretarem-se os dados gravimétricos torna-se necessária a separação regional-residual destes, para se destacar as feições de interesse. Existem diversos métodos para se efetuar essa separação. O intérprete desse estudo de caso escolheu a separação regional-residual por controle geológico. E o interesse da *Pérez Companç S.A* são as camadas acima do embasamento, logo, o regional se construiu a partir de informações de profundidade do embasamento por meio dos pontos de controle. Daí o nome do método de separação regional-residual ser chamada de regional-residual controlado.

Devido ao fato das elevações topográficas do terreno de interesse estarem no intervalo de 50 a 200 metros do nível do mar, escolheu-se este nível como DATUM. A figura 39 ilustra o Mapa Bouguer obtido através de redução ao DATUM das leituras aerolevantadas de  $g$ . Utilizou-se de conhecimentos topográficos da região (figura 38), para eliminação precisa das camadas que encontram acima do nível médio do mar (NMM).

Através dos pontos de controle, que reconhecem as profundidades de interesse, foi possível obter o residual, considerado como as camadas de densidades menores acima do embasamento a até o nível do mar para o caso do residual do embasamento e as camadas de densidade menores entre a base do Cretáceo e o nível do mar para o caso da base do Cretáceo. E tendo também o Mapa de Anomalia Bouguer no nível do mar, foi possível então determinar o regional nos pontos de controle tanto para o embasamento quanto para a base do Cretáceo.

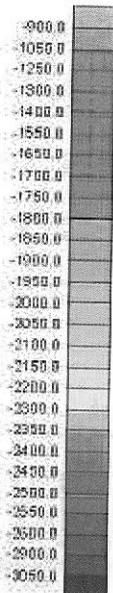
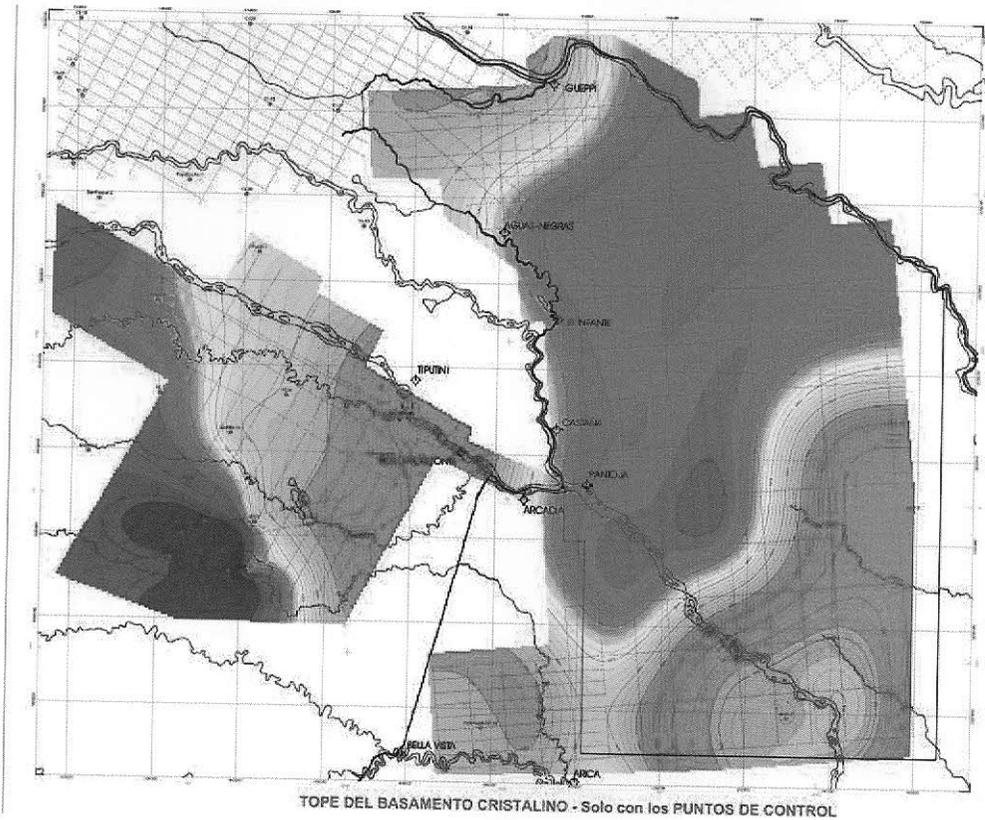
Através de conhecimentos geológicos e experiência por parte do intérprete, Victor estendeu os valores regionais dos pontos de controle a toda a área de interesse, e os resultados foram os mapas regionais controlados do topo do embasamento (figura 40) e da base do Cretáceo (figura 41) em relação ao NMM. Com isso, através da subtração deste regional da anomalia Bouguer, obteve-se os mapas residuais controlados do topo do embasamento (figura 42) e da base do Cretáceo (figura 43).

A partir dos dados residuais, pôde ser feita uma inversão 3D, que ajustou automaticamente os modelos geológicos iniciais das figuras 36 e 37 aos dados residuais, e os resultados foram as figuras 44 e 45, o topo do embasamento e a base do Cretáceo remodelados pela análise computacionais dos resíduos. Com isso, os relevos e contrastes de densidades dessas interfaces geológicas ficaram muito mais refinados do que estavam nos modelos iniciais.

O último passo foi a modelagem manual, por parte do intérprete, das superfícies geradas (figuras 44 e 45) pelo método da inversão, para um ajuste final entre as anomalias calculadas pelo programa de computador e as anomalias observadas. As figuras 47 e 48 ilustram a interpretação estrutural detalhada do topo do embasamento e da base do Cretáceo por Victor Graterol, onde aparecem falhas, altos e baixos estruturais, dentre outros. A figura 49 mostra finalmente um dos perfis finais do modelo de inversão 3D que foi calibrado manualmente pelo intérprete. Esse perfil é uma seção transversal dos modelos 47 e 48, tendo as camadas intermediárias entre o topo do embasamento e a base do Cretáceo sido adicionadas de acordo com o conhecimento de Victor.

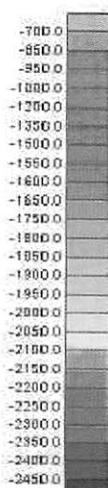
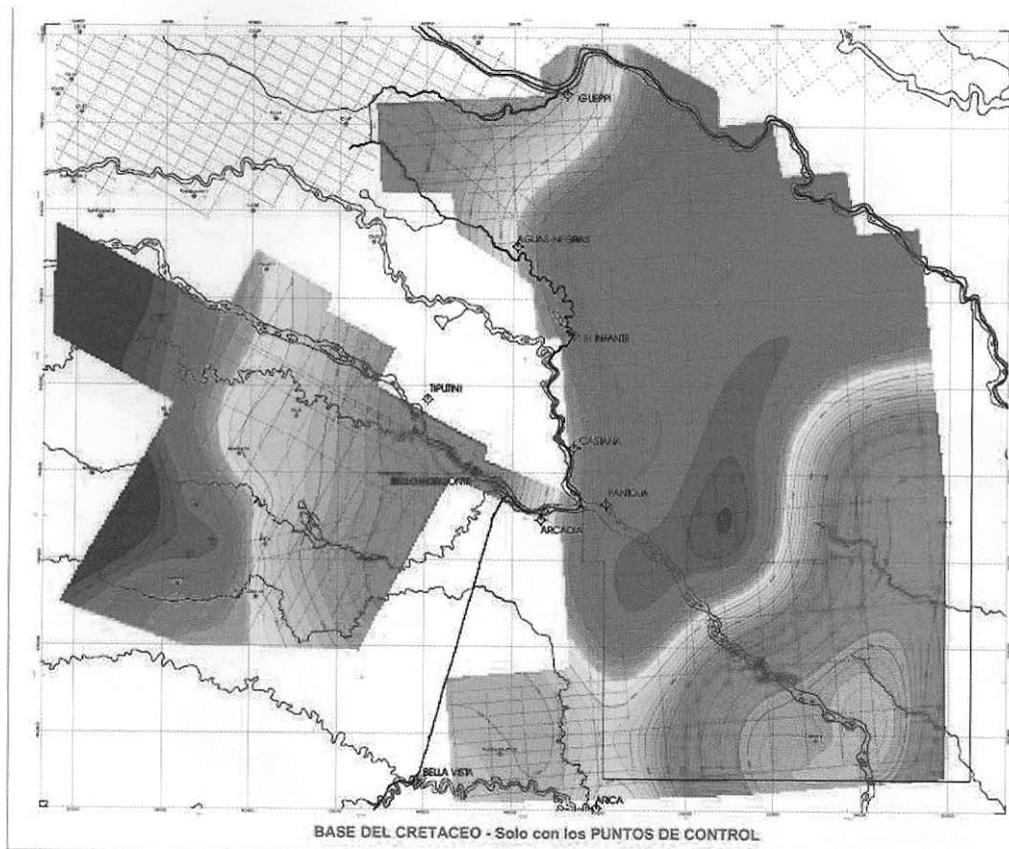
#### 5.10.4 Conclusões

O intérprete cumpriu o objetivo principal deste relatório, que foi definir de forma mais precisa as camadas entre o topo do embasamento e a base do Cretáceo, além de identificar feições de interesse para a indústria petrolífera nessa área, como as falhas por exemplo.



**Tope Basamento (Solo Puntos de Control)**  
REF. NMM [ Metros ]

Figura 36 – Modelo Geológico do Topo do embasamento cristalino  
Fonte: GRATEROL(2002)



Base del Cr. ( Solo Puntos de Control)  
REF NMM [Metros]

Figura 37 – Modelo Geológico da base do Cretáceo  
Fonte: GRATEROL(2001)

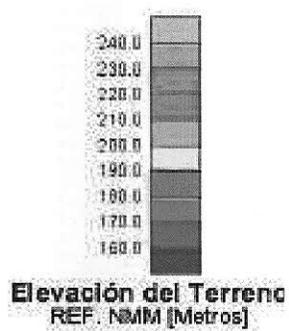
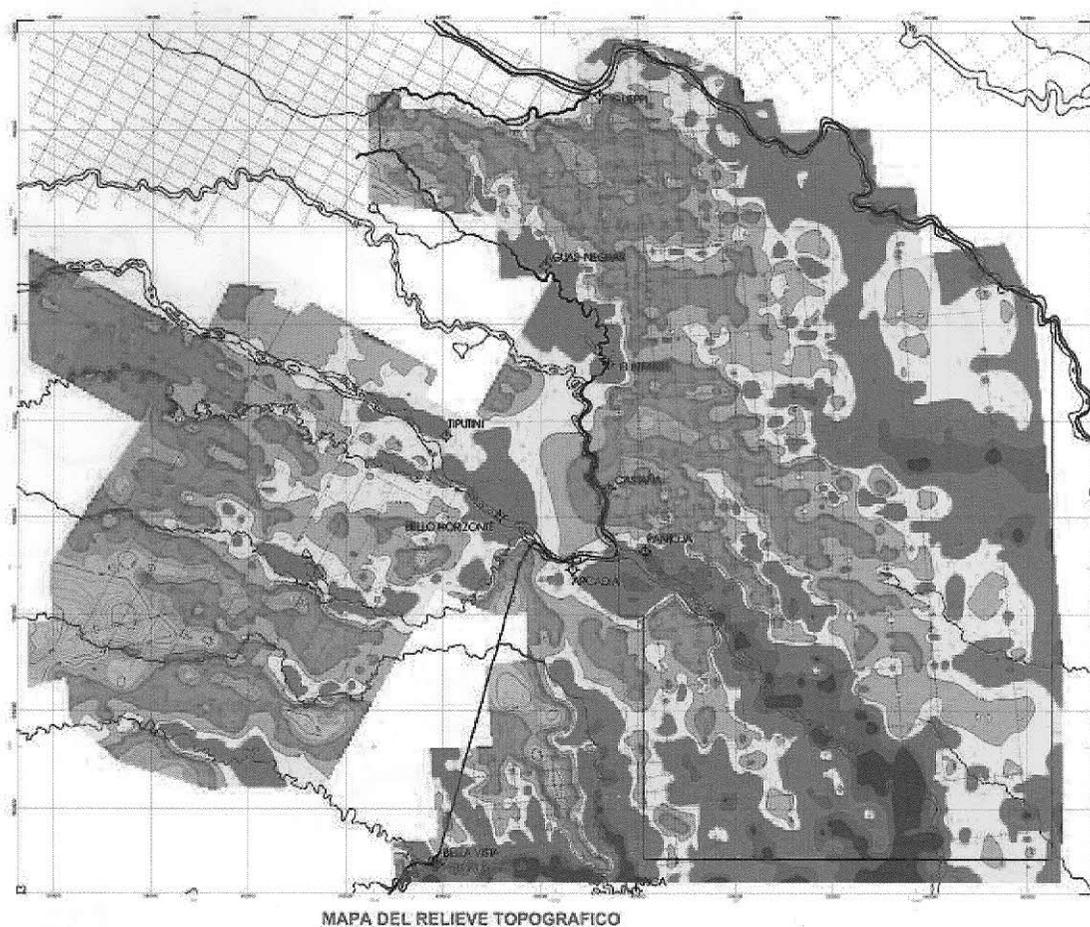


Figura 38 – Mapa topográfico da área de levantamento  
Fonte: GRATEROL(2002)

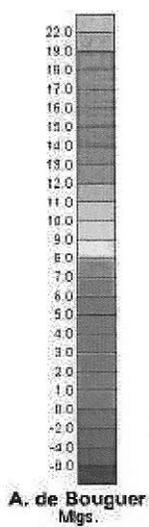
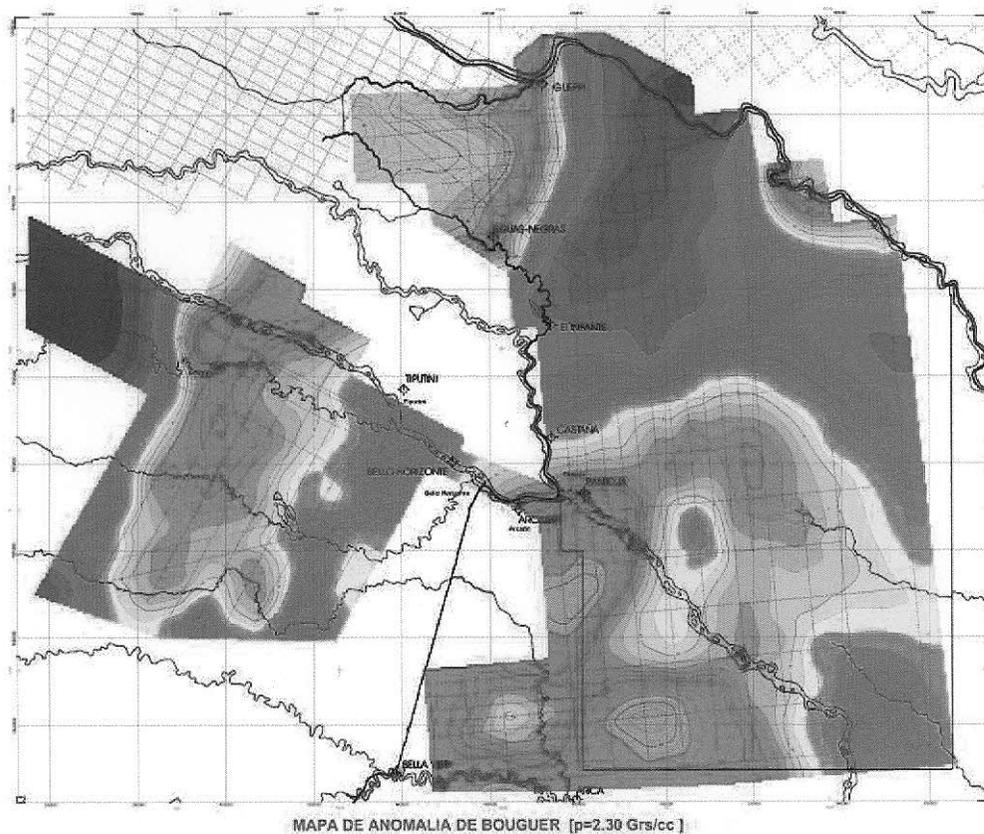
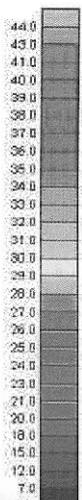
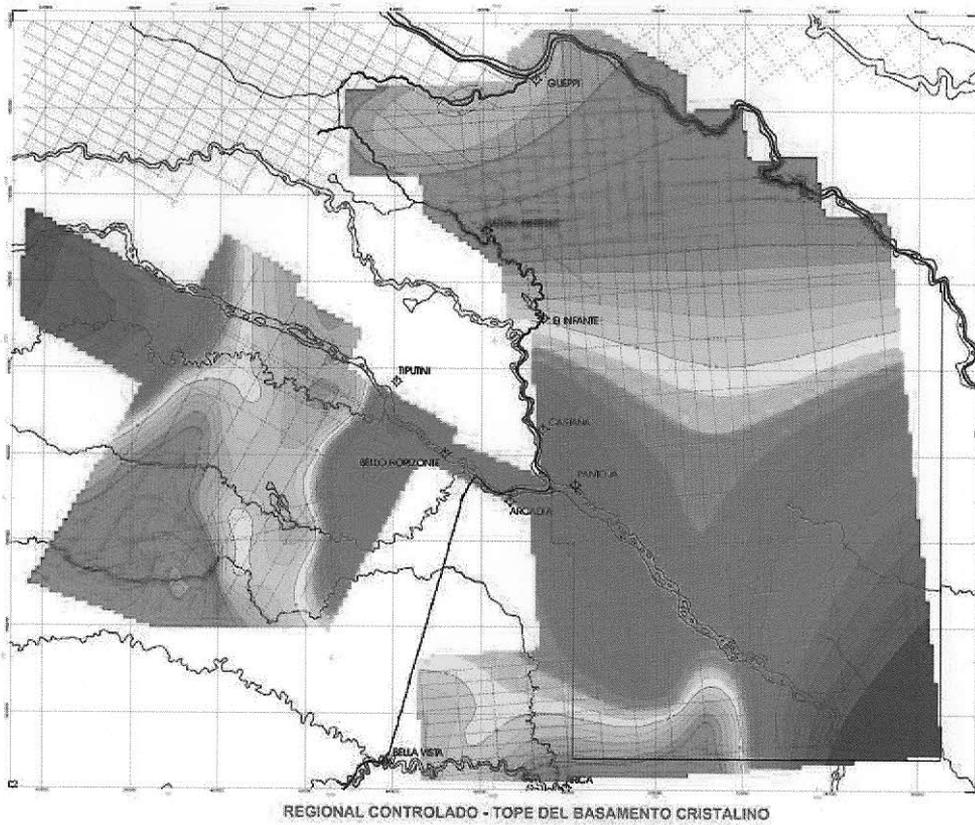
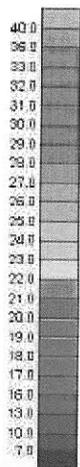
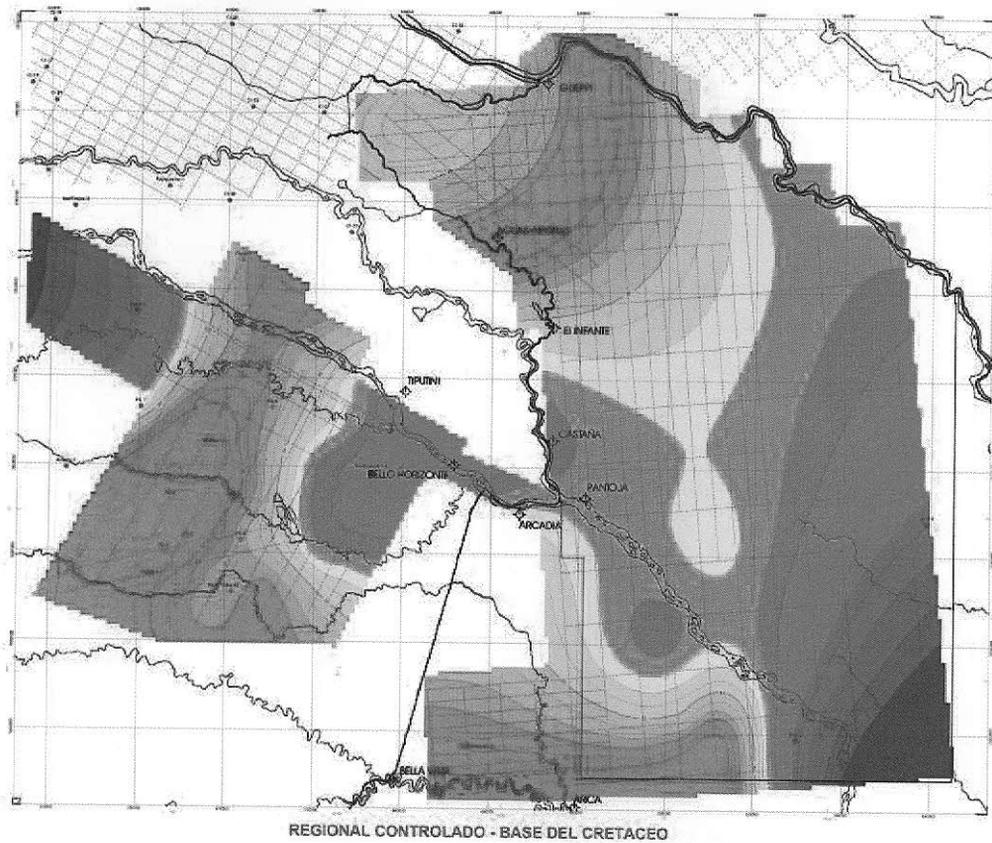


Figura 39 – Mapa Bouguer, com DATUM no nível do mar  
Fonte: GRATEROL(2002)



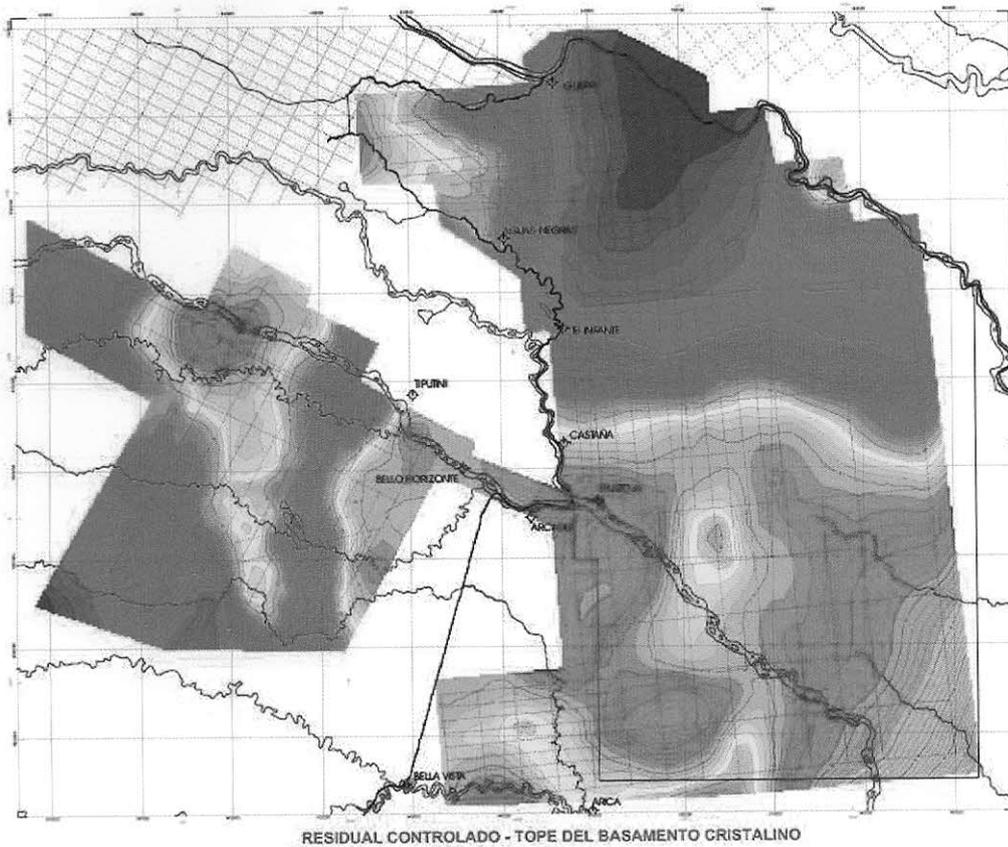
**REG. Controlado-Topo Basamento**  
REF. NMM [Mgs.]

Figura 40 – *Mapa Regional Controlado do topo do embasamento*  
Fonte: GRATEROL(2002)

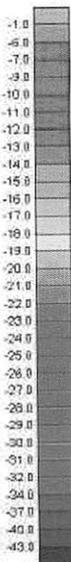


**REG. Controlado-Base del Cretáceo**  
REF. NMM (Mts)

Figura 41 – Mapa Regional Controlado da base do Cretáceo  
Fonte: GRATEROL(2002)

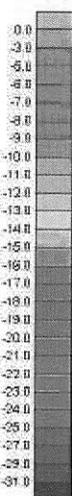
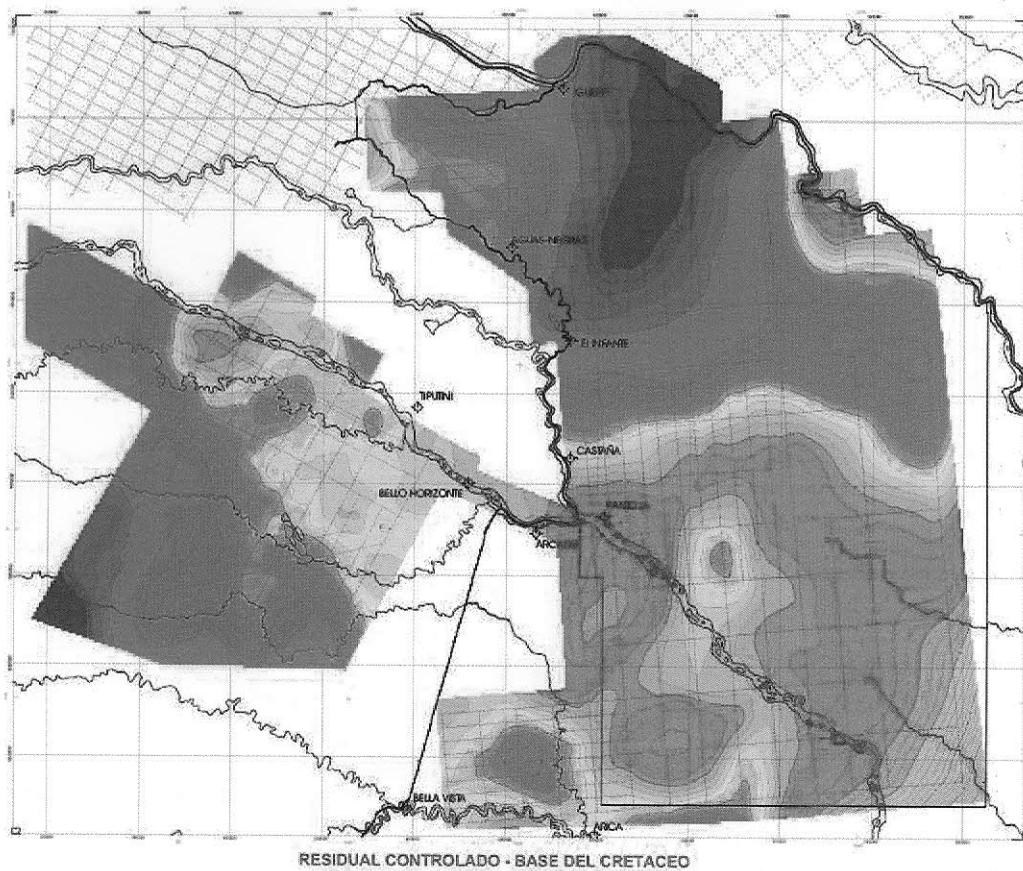


RESIDUAL CONTROLADO - TOPE DEL BASAMENTO CRISTALINO



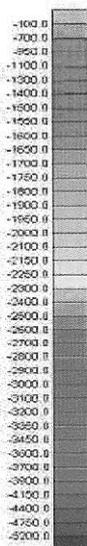
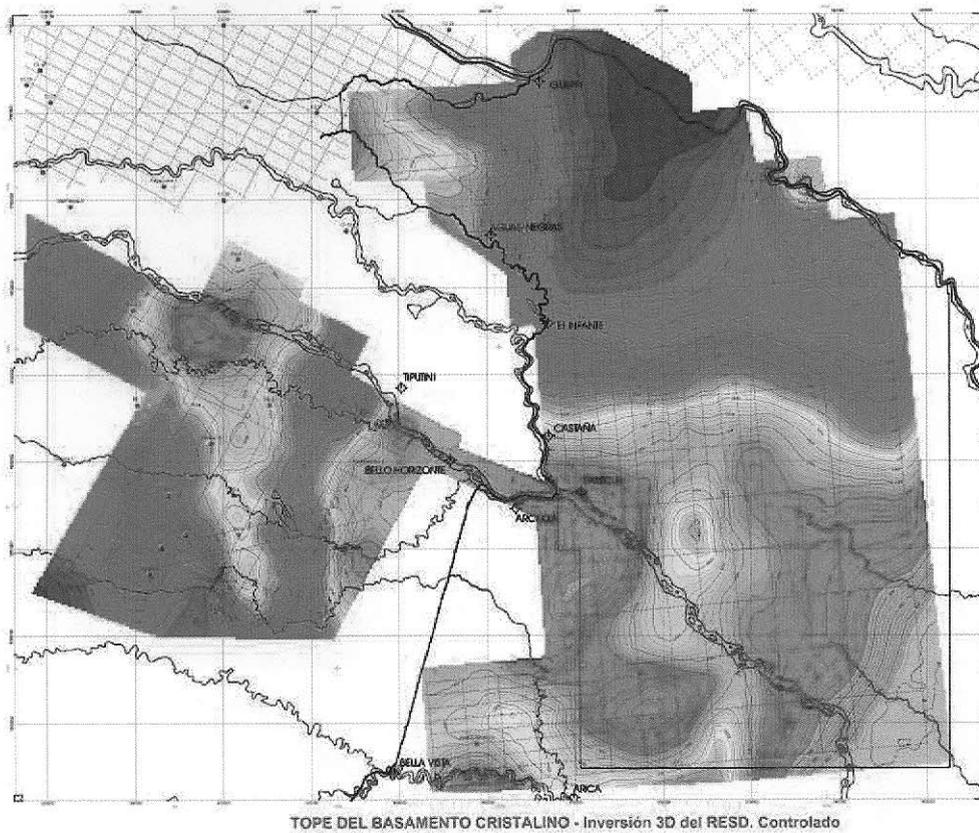
RESID. Controlado-Topo del Basamento  
REF. NMM (Mgs.)

Figura 42 – Mapa Residual Controlado do topo do embasamento  
Fonte: GRATEROL(2002)



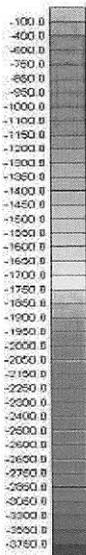
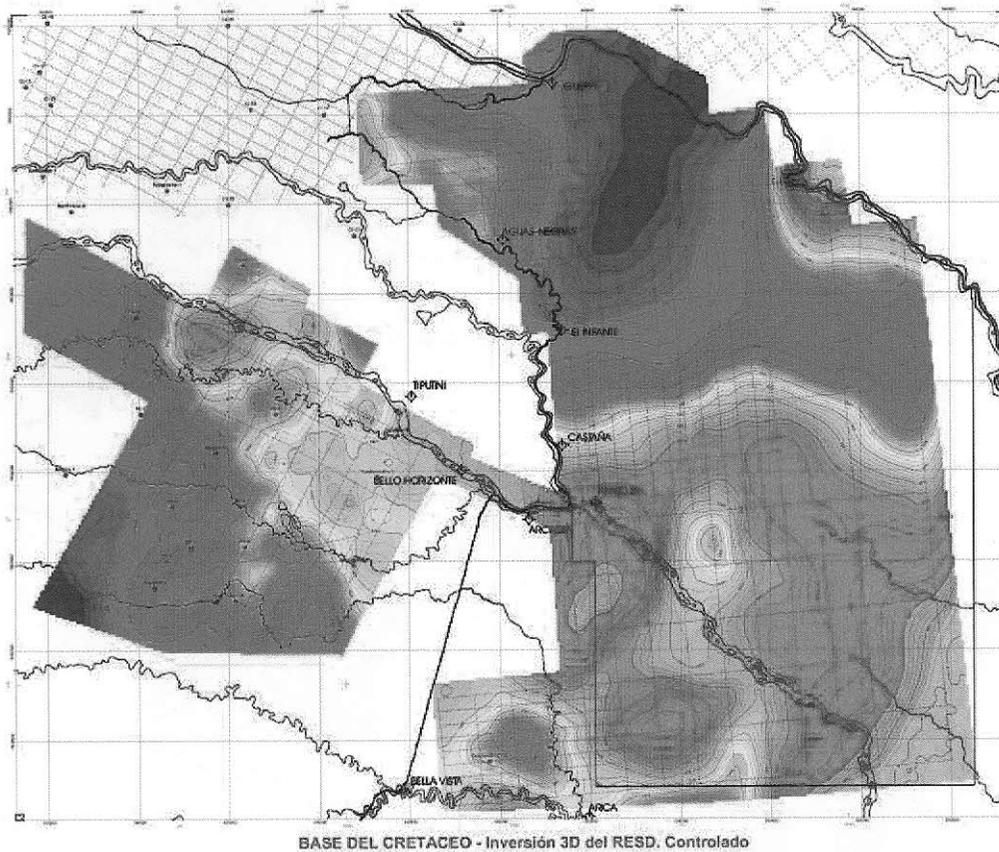
**RESD. Controlado-Base del Cretáceo**  
REF. NMM [Mgs]

Figura 43 – Mapa Residual Controlado da base do Cretáceo  
Fonte: GRATEROL(2002)



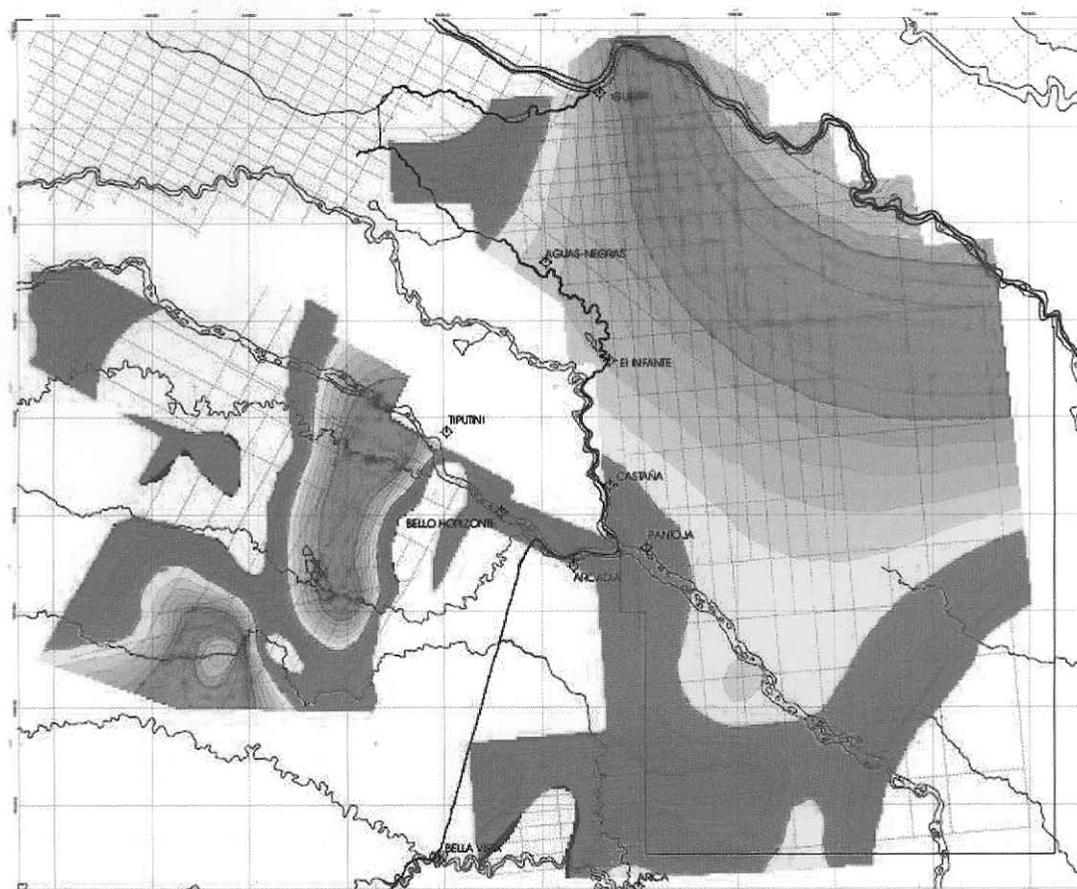
Topo del Basamento Inv. 3D del RESD. CON.  
REF. NMM [Metros]

Figura 44 – Novo modelo geológico para o topo do embasamento, obtido após o uso da Inversão 3D  
Fonte: GRATEROL(2002)

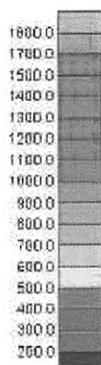


Base del Cretáceo - Inv. 3D del RESD. CON.  
REF. NMM [Metros]

Figura 45 – Novo modelo geológico para a base do Cretáceo, obtido após o uso da Inversão 3D  
Fonte: GRATEROL(2002)

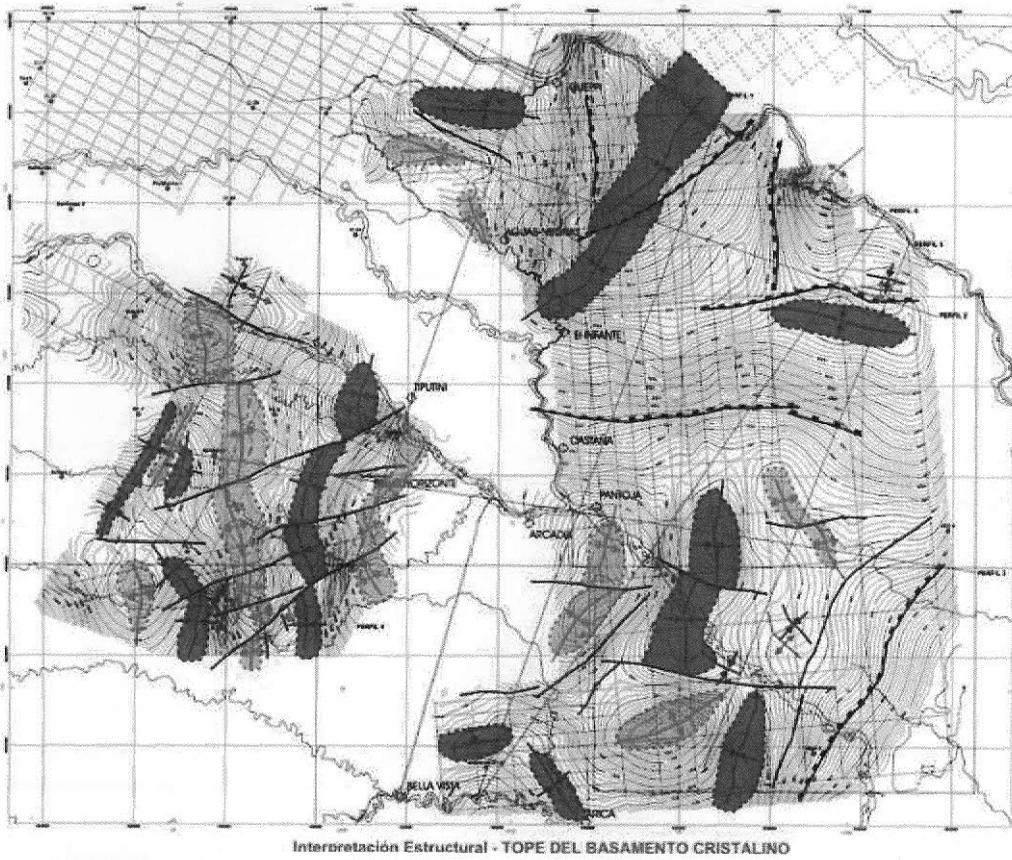


ISOPACO ( Sedimentos JURASICO-PALEOZOICOS) entre Topo del BASAMENTO y BASE DEL CRETACEO



ISOPACO(Sed. Ju-PA entre Basamento y Base del Cr.)  
Metros

Figura 46 – Mapa de mesmas espessuras (isópacas) das camadas que situam entre o topo do embasamento e a base do Cretáceo, elaborado a partir da diferença de altitudes em relação aos modelos de Inversão 3D para o topo do embasamento e a base do Cretáceo  
Fonte: GRATEROL(2002)



### LEYENDA DE SIMBOLOS

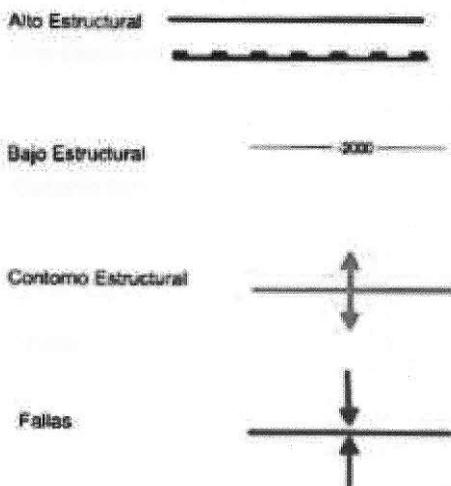
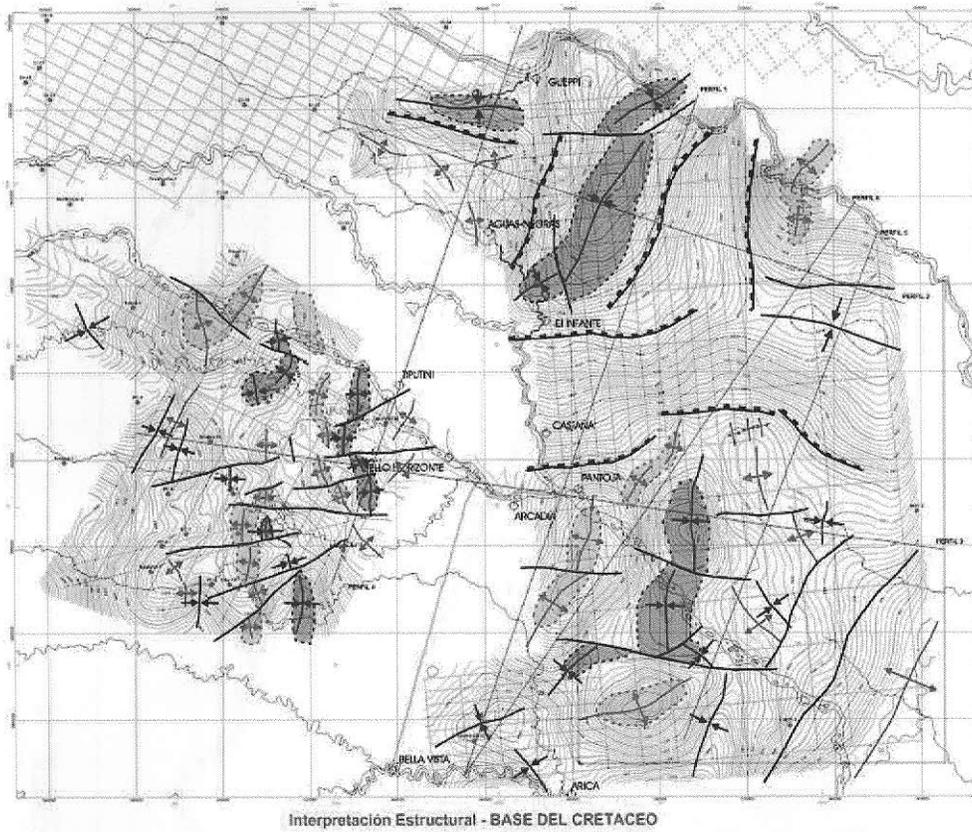


Figura 47 – Interpretação estrutural do embasamento, elaborada por Dr. Victor Graterol. Na figura, aparecem os altos estruturais, baixos estruturais, contornos estruturais e falhas  
 Fonte: GRATEROL(2002)



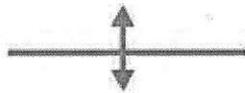
Alto Estructural



Bajo Estructural



Contorno Estructural



Fallas

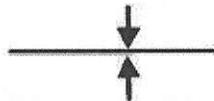


Figura 48 – Interpretação estrutural da base do cretáceo elaborada por Dr. Victor Graterol. Na figura, aparecem os altos estruturais, baixos estruturais, contornos estruturais e falhas. Fonte: GRATEROL(2002)

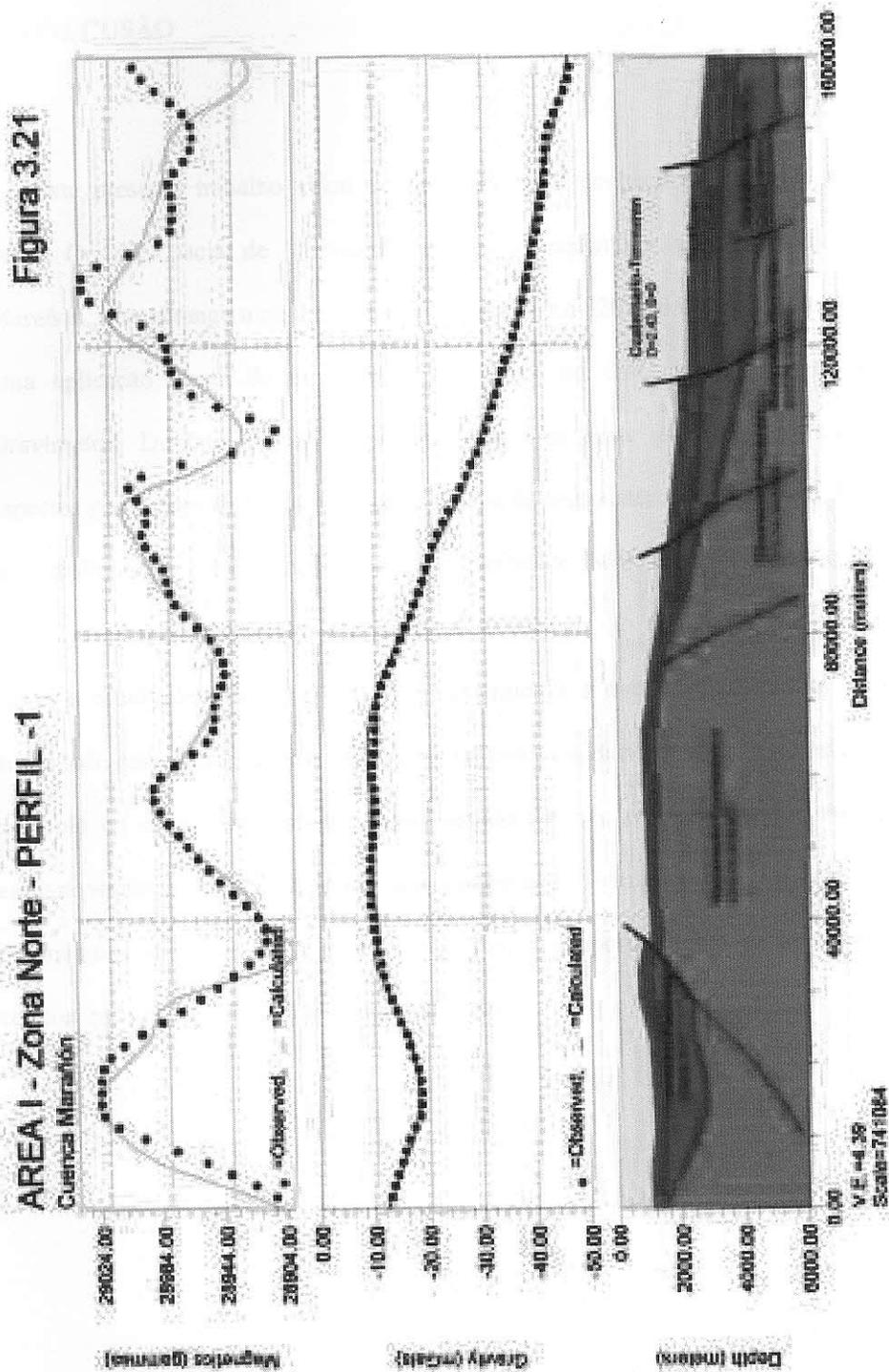


Figura 49 – Visualização de um dos perfis finais do modelo geológico, já modificado após a inversão 3D para ajuste final entre os dados calculados pelo computador e os dados observados.

Fonte: GRATEROL(2002)

## 6 CONCLUSÃO

Este presente trabalho visou expor os diversos conhecimentos geológicos relativos à Bacia Oriente, bacia de "foreland" andina pertencente à província Putumayo-Oriente-Marañon, que abrange uma área de aproximadamente  $320.000\text{Km}^2$ , para em seguida analisar uma aplicação direta de um método geofísico, no caso deste trabalho, o método de Gravimetria. De fato, devido à existência de uma vasta gama de informações sobre os aspectos geológicos da Bacia Oriente, inclusive de seus sistemas petrolíferos, a primeira parte do trabalho pôde ser realizada com certa facilidade. Mas, conforme já dito, aplicações de Gravimetria na Bacia Oriente ou são escassas ou não são divulgadas publicamente. Apesar disso, o estudo de caso aqui tratado e que aplicava o método geofísico de Gravimetria foi sustentado por conhecimentos geológicos retirados da Bacia Oriente. Este estudo foi um bom exemplo de como a gravimetria, neste estudo de caso representada por um levantamento aerogravimétrico, é capaz de ajudar a se conhecer de forma mais precisa aspectos geológicos de interesse em uma dada região. Por isso, a proposta global deste trabalho pôde ser concretizada por inteiro e de forma satisfatória.

## REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- 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: 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.
- 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, v. 62, p. 559-571, 1995.
- 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: geología 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.

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.

ESTUPIÑÁN, J. *et al.* Diagénesis y estratigrafía secuencial de la arenisca «U» de la Fm Napo del Oriente, Ecuador. **Geogaceta**, Salamanca, n. 40, p. 283-286, Jul. 2006. ISSN 0213-683X

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, JohnM. 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.

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, v. 423, p. 423-444, 1995.

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.

PERUPETRO, **Library**. Disponível em: <<http://mirror.perupetro.com.pe/home-e.asp>>  
Acesso em: 10/11/2008

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.

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

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.

BASKERVILLE, Marion. **Classical dynamics of particles and systems**. 04<sup>a</sup> ed. Londres. Saunders College, 1995. v.18, 638 p. ISBN 0030973023

BUONORA, Marco. **Programa de Formação Petrobras Geofísico Júnior:** Teoria de gravimetria e magnetometria. 01<sup>a</sup> ed. Rio de Janeiro. Petrobrás, 2006. 65 p.

BUONORA, Marco. **Curso para Trainees\_JAN2007**. Rio de Janeiro. Petrobrás, 2007. CD-ROM

FERNANDES, Carlos. **Fundamentos de Prospecção Geofísica**. 01<sup>a</sup> ed. Rio de Janeiro. Interciência Ltda, 1984. 190 p. ISBN 520-0023442

GRATEROL, Victor. **Informe Final de Interpretación:** ENERO 2002. Perkasie: Carson Services, Inc., 2002. 52p.

LOWRIE, William. **Fundamentals of Geophysics**. 01<sup>a</sup> ed. Cambridge. Cambridge University Press, 1997. 354 p. ISBN 0-521-46164-2 (hc). ISBN 0-521-46728-4 (pbk.)

SANGER, Larry; WALES, John. **Gravímetro**. Disponível em: <<http://pt.wikipedia.org/wiki/Grav%C3%ADmetro>>  
Acesso em: 25/07/2007

TELFORD, William; SHERIF, Robert; GELDART, L. **Applied Geophysics**. 02<sup>a</sup> ed. Cambridge. Cambridge University Press, 1990. 770 p. ISBN 0-521-32693-1(hc). ISBN 0-521-33938-3(pbk.)