



UFRJ

Guilherme Sidou Canha

GRAVIMETRIA APLICADA A UMA PORÇÃO DA BACIA AUSTRAL

Sistema de falhas Magallanes-Fagnano

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:

Álvaro Lúcio de Oliveira Gomes
Leonardo Fonseca Borghi de Almeida
Paula Lúcia Ferrucio da Rocha

Rio de Janeiro

Julho de 2007



MGL
C221G

CANHA, Guilherme Sidou

Gravimetria aplicada a uma porção da bacia Austral:
Sistema de falhas Magallane-Fagnano / Guilherme Sidou Canha -
Rio de Janeiro: UFRJ / IGeo, 2007.

93 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: Leonardo Fonseca Borghi de Almeida, Paula Lúcia Ferrucia da Rocha

1. Geofísica. 2. Geologia de Engenharia e Ambiental – Trabalho de Conclusão de Curso. I. Leonardo Fonseca Borghi de Almeida, Paula Lúcia Ferrucia da Rocha. II. Universidade Federal do Rio de Janeiro, Instituto de Geociências, Programa de Pós-graduação em Geologia. III. Gravimetria aplicada a uma porção da bacia Austral.

Guilherme Sidou Ganha

GRAVIMETRIA APLICADA A UM PORÇÃO DA BACIA AUSTRAL

Sistema de falhas Magallanes-Fagnano

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:

Álvaro Lúcio de Oliveira Gomes
Leonardo Fonseca Borghi de Almeida
Paula Lúcia Ferrucio da Rocha

Aprovada em: 31.Julho.2007

Por:

Álvaro Lúcio de Oliveira Gomes

Leonardo Fonseca Borghi de Almeida

Paula Lúcia Ferrucio da Rocha

UFRJ
Rio de Janeiro
2007

À memória de meu pai, Rildo Peixoto Canha.
À minha filha Maria Luíza.
À minha esposa Roberta.
À minha mãe Ana Teresa.

AGRADECIMENTOS

Agradeço à minha família, em especial a minha esposa Roberta e a minha filha Maria Luíza pelo apoio, e pela paciência durante estes últimos 9 meses.

Agradeço à Petróleo Brasileiro S.A, a todos os professores da UFRJ e aos colegas que colaboraram efetivamente para a elaboração desta monografia.

"Luz, mais Luz..... está no ponto."
Ri/do Peixoto Ganha

Resumo

CANHA, Guilherme Sidou. Gravimetria aplicada a uma porção da bacia Austral: Sistema de falhas Magallanes Fagnano. 2007. 93p. 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.

O texto foi baseado em uma pesquisa bibliográfica nos diversos temas envolvidos, e busca sintetizar a estratigrafia, geologia histórica, geologia estrutural e os sistemas petrolíferos da bacia Austral, como também, busca enfatizar o método prospectivo gravimétrico e sua aplicação na bacia. No estudo de caso, os dados gravimétricos em conjunto com os dados geológicos e magnetométricos foram integrados, procurando delinear através de um modelo numérico as principais características estruturais e o cenário tectônico da porção sul da bacia Austral, chamada de Ilha da Terra do Fogo mais precisamente no sistema de falha Magallanes-Fagnano.

Palavras-chave: bacia Austral; gravimetria; falha Magallanes-Fagnano.

Abstract

CANHA, Guilherme Sidou. **Applied gravimetry in an area of Austral basin: Magallanes-Fagnano fault system.** 2007. 93p. 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.

The bibliographical research was based in several themes involving stratigraphy, historical geology, structural geology and the petroleum systems of the Austral basin emphasizing the gravimetric method applied on the basin. The case study analyses the integration of the gravity, geologic and magnetic data integrated and try to delineate through a numeric model the main structural settings and the tectonic "scenario" of the south portion of the Austral basin called "Ilha da Terra do Fogo" more precisely in the Magallanes-Fagnano fault system.

Key-Words: Austral basin; gravimetry; Magallanes-Fagnano fault.

Lista de Figuras

Figura 1 - Mapa geológico simplificado, parte sul da América do Sul.	2
Figura 2 - Mapa de localização da bacia Austral, observar isolinhas de espessura de cobertura sedimentar e as principais delimitações da bacia	6
Figura 3 - Carta cronoestratigráfico da bacia Austral	8
Figura 4 - Distribuição dos afloramentos da Série Tobífera (rosa) e equivalentes	9
Figura 5 - Coluna estratigráfica da Formação Springhi/1 contando com informações geofísicas de sondagem (sônico em laranja, raios gama em verde e análise de litofácies) -	10
Figura 6 - Bacia Austral, contexto geotectônico, localização e geometria geral. As quatro zonas morto-estruturais são representadas por zona de plataforma (Plataforma de Springhi/1), zona de flexura ou talude (Talud), zona de bacia profunda (cuenca) e zona dobrada (Faja Plegada).....	16
Figura 7 - Mapa geológico e estrutural da porção sul dos Andes e bacia Austral. O embasamento consiste em rochas metasedimentares do paleozóico, intrusões, ofiolitos e rochas volcanoclásticas do Jurássico. As estruturas são empurrões, falhamentos transcorrentes (representadas por meia setas brancas indicando o movimento) e falhas normais (no símbolo os traços duplos representam o bloco baixo).....	17
Figura 8 - Fase rifte da bacia Austral e abertura do Mar de Wede/1	19
Figura 9 - Evolução tectônica da bacia Austral	21
Figura 10 - Principais características do sistema petrolífero Inoceramus Inferior (Springhi/1 e Magafanes Inferior) da bacia Austral e distribuição atual da janela de geração de hidrocarbonetos.	28
Figura 11 - Reservatório em fraturas cataclásticas em rochas riolíticas.....	30
Figura 12 - Curva de deriva do gravímetro calculada a partir de leituras sucessivas numa posição fixa.	41
Figura 13 - (a) Variação da velocidade angular com a latitude. (b) Representação exagerada da forma da Terra	42
Figura 14 - (a) Correção de ar livre de uma observação situada a uma altura h acima do datum. (b) Correção de Bouguer. (c) Correção de Terreno.....	45
Figura 15 - Variação da gravidade devida às atrações do Sol e da Lua em Belém, Pará, Brasil (coordenadas: $1^{\circ} 30'$ sul - $48^{\circ} 30'$ oeste; altitude= 14 m).	46
Figura 16 - Ilustração do modelo de compensação isostática teoria de Airy e teoria de Pratt.	48
Figura 17 - Efeito da gravidade em um seção geológica falhada e em uma seção geológica com embasamento com diferentes densidades.....	53
Figura 18 - Efeito de gravidade causado por corpos de geometria simples e densidade constante.	54
Figura 19 - Efeito da gravidade sobre um esfera em diferentes profundidades.	55
Figura 20 - Efeito da gravidade sobre um bloco semi-infinito em diferentes profundidades.	55
Figura 21 -Localização da área do estudo de caso. No diagrama(i), mapa tectônico; em (ii) mapa geológico simplificado da Ilha da Terra do Fogo	58
Figura 22 - Mapa geológico simplificado da porção leste da Ilha da Terra do Fogo, Tassone et ai. (2005).	61
Figura 23 - Mapa geológico da porção leste do Lago Fagnano. Tassone et ai. (2005).....	62

Figura 24 - (A) - Mapa da área estudada, mostrando a distribuição dos pontos geofísicos; (B) - Mapa topográfico; (C) - Mapa de anomalia bouguer completa; (D) - Mapa magnético campo total	68
Figura 25 - Perfis N-S e NW-SE localizados na figura 24-A, anomalia Bouguer, anomalia magnética e perfil topográfico.....	68
Figura 26 - Modelo numérico 20 criado com o dado proveniente da anomalia Bouguer completa	69
Figura 27 - Seção geológica interpretada baseada no modelo numérico gravimétrico combinado dados estruturais e geológicos de campo.....	71

Lista de Tabelas

Tabela 1 - Características geoquímicas das principais rochas geradoras da bacia Austral.	26
Tabela 2 - Valores medidos de suscetibilidade magnética para cada unidade geológica.....	65

SUMÁRIO

Agradecimentos	vi
Resumo	viii
Abstract	ix
Lista de Figuras	x
Lista de Tabelas	xi
1 INTRODUÇÃO	1
2 OBJETIVO	3
3 MÉTODO	3
4 CONTEXTO GEOLÓGICO DA BACIA	4
4.1 Introdução	5
4.2 Estratigrafia	6
4.3 Geologia Estrutural	14
4.4 Geologia Histórica	18
4.4.1 PRIMEIRA ETAPA RIFTE	18
4.4.2 SEGUNDA ETAPA: SUBSIDÊNCIA TÉRMICA	20
4.4.3 TERCEIRA ETAPA: DESENVOLVIMENTO DA BACIA "FORELAND"	20
4.5 Geologia do Petróleo	22
4.5.1 ROCHA GERADORA E GERAÇÃO	24
4.5.2 MIGRAÇÃO	26
4.5.3 TRAPEAMENTO	28
4.5.4 RESERVATÓRIOS	29
5 GRAVIMETRIA	32
5.1 Introdução	32
5.2 Teoria básica	33
5.3 Medidas de gravidade	36
5.3.1 GRAVIMETROS	37
5.3.1.1 Gravímetros absolutos	37
5.3.1.2 Gravímetros relativos	38
5.3.2 PROCEDIMENTOS PARA A TOMADA DE MEDIDAS DE GRAVIDADE UTILIZANDO GRAVIMETROS	39
5.4 Correções ou reduções dos valores de gravidade	40
5.4.1 CORREÇÃO DE DERIVA (DRIFT) INSTRUMENTAL	41
5.4.2 CORREÇÃO DE LATITUDE	41
5.4.3 CORREÇÕES DE TERRENO	42
5.4.3.1 Correção de ar livre (Free-Air ou de Faye) (C_a)	43

5.4.3.2 Correção Bouguer (C_b).....	43
5.4.3.3 Correção de curvatura (C_c).....	44
5.4.3.4 Correção de terreno (C_t).....	44
5.4.4 CORREÇÃO DE MARÉ	46
5.4.5 CORREÇÃO DE EÓTVÓS (C_{Eot})	46
5.4.6 CORREÇÃO ISOSTÁTICA (C_i).....	47
5.5 Anomalias gravimétricas	48
5.5.1 ANOMALIA DE AR LIVRE	48
5.5.2 ANOMALIA BOUGUER SIMPLES	49
5.5.3 ANOMALIA BOUGUER COMPLETA	49
5.5.4 ANOMALIA ISOSTÁTICA.....	49
5.6 Interpretação de anomalias gravimétricas	50
5.6.1 CONTROLES DA INTERPRETAÇÃO	50
5.6.1.1 Ambiguidade na interpretação	50
5.6.1.2 Anomalia gravimétrica e efeito da gravidade	51
5.6.1.3 Contraste de densidade	52
5.6.1.4 Estrutura x Contraste de densidade do embasamento	52
5.6.1.5 Estimativa de profundidade	53
5.6.1.6 Localização de um contato vertical	56
5.6.1.7 Separação de anomalias regionais e residuais	56
6 ESTUDO DE CASO	57
6.1 Introdução	57
6.2 Geologia	58
6.3 Geofísica	60
6.3.1 MEDIDAS GEOFÍSICAS.....	63
6.3.1.1 Gravimetria	63
6.3.1.2 Magnetometria e suscetibilidade magnética	64
6.3.2 RESULTADOS E INTERPRETAÇÃO GEOFÍSICA	65
6.3.2.1 Perfis geofísicos e mapas	65
6.3.2.2 Modelo de gravidade bidimensional e seção geológica interpretada	68
7 CONCLUSÃO.....	72
8 REFERENCIAS BIBLIOGRAFICAS	75

1 INTRODUÇÃO

A bacia Austral, também conhecida como bacia de Magalhães cobre uma área de 230.000 km², alcançando aproximadamente 700 km em comprimento e 370 km em largura nas suas extensões máximas (Biddle *et al.*, 1986).

O descobrimento de hidrocarbonetos na bacia Austral ocorre como resultado de uma intensa e variada atividade de investigação e exploração dos recursos naturais que ocorrem desde o final do século XIX, tanto no Chile como na Argentina, países em que a bacia Austral está localizada. A bacia Austral nos últimos anos tem sido a maior supridora de óleo e gás do Chile e da Argentina, observar a distribuição de campos de óleo e gás na Figura 1.

O texto a seguir além de sintetizar a estratigrafia, geologia histórica, geologia estrutural e os sistemas petrolíferos da bacia Austral, busca também, enfatizar o método prospectivo gravimétrico e sua aplicação à bacia objeto deste texto.

O método gravimétrico possui o objetivo principal de detectar as mudanças de densidades laterais existentes entre os corpos de rocha e estruturas, é utilizado para o estudo de pequenas e grandes áreas, em escala de detalhe a escala regional de mapeamento. Pode ser executado em terra, oceano ou ar.

No estudo de caso, poderá ser observado um levantamento gravimétrico em escala semi-regional. Os dados gravimétricos em conjunto com os dados geológicos e magnetométricos foram integrados, e os autores procuraram delinear através de um modelo numérico, as principais características estruturais e o cenário tectônico da porção Argentina da Ilha da Terra do Fogo mais precisamente no sistema de falha Magallanes-Fagnano (MFS).

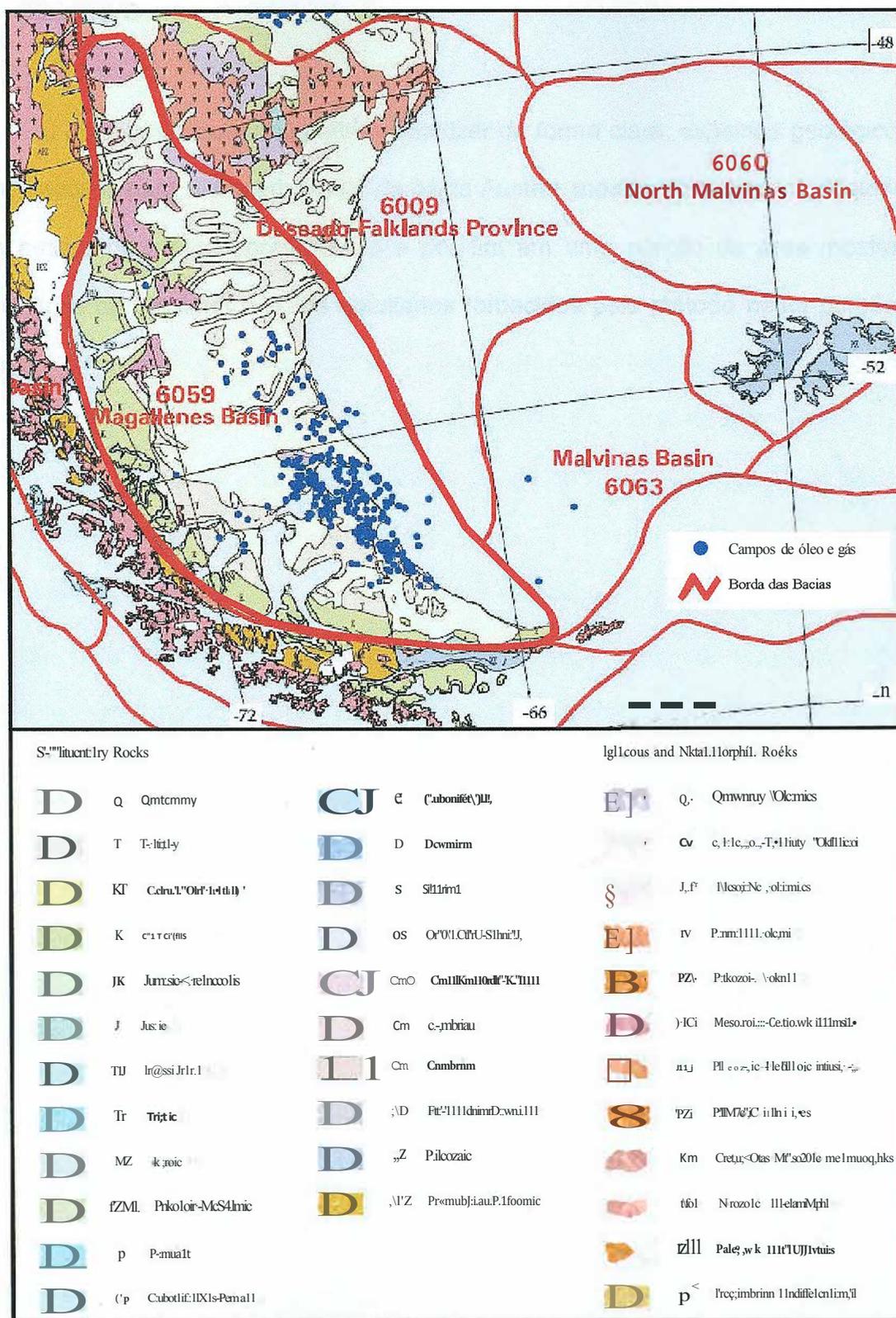


Figura 1 - Localização e simplificação das províncias geológicas da parte sul da América do Sul, enfatizando a bacia de Magallanes (Austral). Adaptado de Shenck et al. (1997).

2 OBJETIVO

O objetivo desta monografia é sintetizar de forma clara, aspectos geológicos e prospectivos para hidrocarbonetos da bacia Austral, mostrar os conceitos adquiridos no estudo do método gravimétrico e por fim em uma porção da área mostrar a aplicação da gravimetria e, os resultados fornecidos pelo método nesta porção da bacia.

3 MÉTODO

O trabalho foi dividido em duas etapas: a primeira etapa foi realizado uma pesquisa bibliográfica em grupo, para que depois se fizesse a montagem do texto geológico referente a bacia Austral; na segunda etapa, cada componente do grupo ficou responsável por um método geofísico, previamente determinado, para que então complementasse a monografia com um texto individual.

O grupo responsável pela bacia Austral foi composto pelos seguintes geofísicos: Guilherme Sidou Canha, Diego Garcia, Analena Mileó, Max Velásquez e Tiago Nunez. Ficando inicialmente cada componente do grupo responsável por uma parte da geologia, para que ao final fosse integrada em apenas um corpo de texto por um dos componentes do grupo.

Na etapa individual foi realizada duas pesquisa bibliográfica direcionadas: a primeira sobre o método gravimétrico para que assim houvesse a sumarização do método na monografia; a segunda pesquisa, sobre o método gravimétrico aplicado a bacia Austral para que se fizesse o estudo de caso.

O estudo de caso ficou restrito apenas a um artigo, pois o tema gravimetria em conjunto com bacia Austral se mostrou bastante raro nas pesquisas realizadas nas diferentes fontes disponíveis.

4 CONTEXTO GEOLÓGICO DA BACIA

4.1 Introdução

A bacia Austral, também conhecida como bacia de Magalhães, estende-se junto ao limite convergente da placa Sul-americana e a porção oceânica da placa Antártica no extremo sul da América do Sul. A bacia é localizada ao sul da junção tripla onde as placas Nazca, Sul-americana e Antártica se encontram. Sua orientação geral é NNW-SSE, e cobre uma área de 230.000 km², alcançando aproximadamente 700 km em comprimento e 370 km em largura nas suas extensões máximas (Biddle *et al.*, 1986).

O desenho da bacia é triangular, sua parte axial contém até 8000 m de sedimentos depositados, que ficam menos espessos para leste, com espessura entre 1000 m e 2000 m na área de plataforma (Figura 2). Para norte e leste seu limite é definido pelo arco de Dúngenes-Rio Chico, que representa uma elevada porção do embasamento paleozóico. Seu limite sul corresponde a uma zona complexa de encurtamento e dobramento gerada ao longo das bordas das placas Sul-americana e Escócia (Biddle *et al.*, 1986). Para oeste, está limitada pela presença do Batólito Patagônico e das rochas deformadas na zona compressiva, com dobras e falhamentos de empurrão. Para sudeste, por fim, é conectada à bacia de Malvinas.

O descobrimento de hidrocarbonetos na bacia Austral ocorre como resultado de uma intensa e variada atividade de investigação e exploração dos recursos naturais que ocorrem desde o final do século XIX, e princípio do século XX, tanto no Chile como na Argentina, países em que a bacia Austral está localizada (Peroni, 2002). Nos últimos anos, a bacia Austral tem sido a maior supridora de óleo e gás

do Chile e da Argentina (Gonzalez, 1998), na Figura 1 os pontos azuis representam os campos de óleo e gás existentes na região.

Na bacia Austral, são documentadas sucessões de folhelhos betuminosos continentais e marinhos. A Formação Springhill, entre outras, possui intervalos de folhelhos pretos com propriedades para a formação de óleo de alta qualidade. O material orgânico está na janela de óleo rendendo grandes quantias de hidrocarboneto. As principais rochas reservatórios são localizadas dentro das seguintes formações: Formações Tobífera, Formação Springhill e Formação Magallanes.

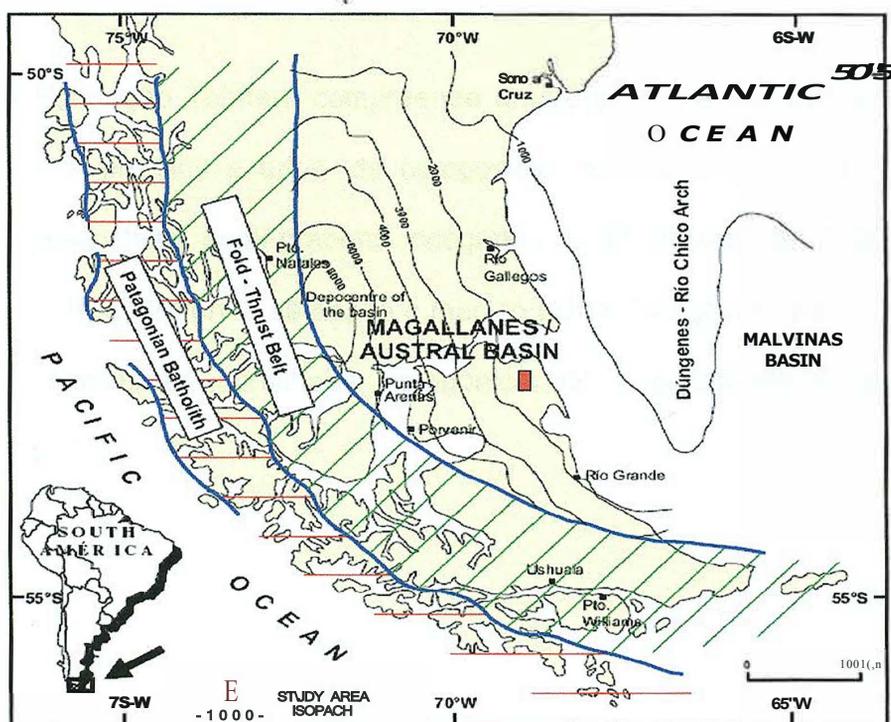


Figura 2 - Mapa de localização da bacia Austral, observar iso/inhas de espessura de cobertura sedimentar e as principais delimitações da bacia. Quattrocchio, 2006.

4.2 Estratigrafia

A bacia Austral inclui rochas que variam em idade do Jurássico até o Quaternário.

No diagrama cronoestratigráfico, representado na Figura 3, é possível observar a síntese - realizada pela Pecom Energia (2002) - de uma série de informações regionais e de poços em diferentes regiões da bacia Austral. As formações Tobífera e Springhill são representadas ao longo de toda a bacia. Depositadas acima destas, encontram-se formações equivalentes com diferentes nomes.

A base da bacia é composta por um complexo acrecionário - desenvolvido durante a zona de subducção da margem Pacífica do Gondwana (Hervé *et al.*, 1981) - e é coberta por vulcânicas ácidas e vulcanoclásticas do meio ao final do Jurássico, que são agrupadas na Formação Tobífera e equivalentes (Thomas, 1949).

A Formação Tobífera compreende um conjunto de rochas vulcânicas ácidas, ignimbritos, brechas e tufos, de composição riolítica a quartzo latito. Em alguns casos preenchem semi-grabens chegando à espessura de 2000 m (Bravo & Herrera, 1997). Estende-se desde o maciço Norte-Patagônico até a Terra do Fogo e desde o oeste da cordilheira Patagônica até a plataforma continental a leste (observar Figura 4).

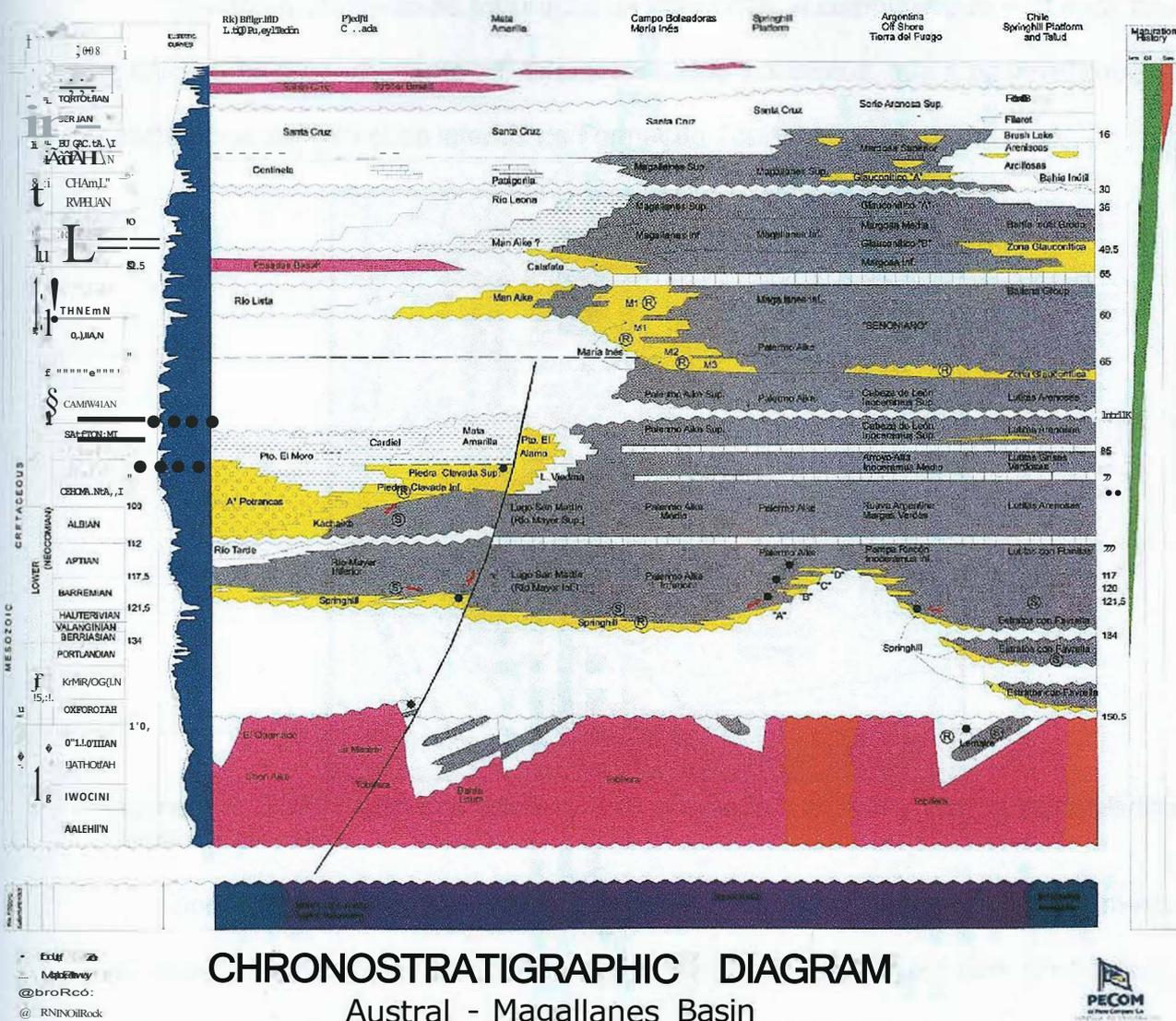


Figura 3 - Diagrama cronoestratigráfico da bacia Austral (Peroni et al., 2002).

Hechem & Homovc (1988), reconhecem três associações de fácies relacionadas à Formação Tobífera: (1) proximal, depósitos piroclásticos grossos sobre ou nas cercanias dos vulcões; (2) média-distal, piroclástitas primárias e secundárias, e rochas de mistura distribuídas em áreas baixas entre os centros efusivos e (3) leque, depósitos de leque aluvial em pequenas bacias associadas aos altos vulcânicos.

Devido ao processo de fraturação da etapa rifle, à complexidade estrutural dos grábens e ao preenchimento em diferentes ciclos vulcânicos, não é possível integrar e determinar as variações laterais da Formação Tobífera.

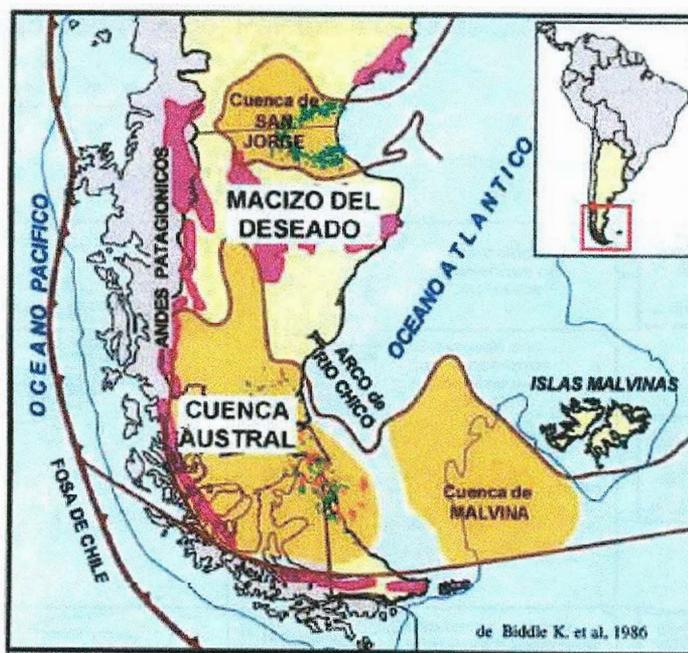


Figura 4 - Distribuição dos afloramentos da Série Tobífera (rosa) e equivalentes (Biddle et al, 1986).

Sobre o ambiente de rifle desenvolveu-se posteriormente o preenchimento elástico conhecido pelas seqüências cretácicas formadas por arenitos continentais, parálicos e marinhos da Formação Springhill e pelos folhelhos conhecidos como "Estratos com Favrella" (Thomas, 1949) (Figura 5).

Considerando sua importância econômica como produtora de hidrocarbonetos e sua ampla distribuição geográfica, a Formação Springhill constitui a unidade sedimentar que mais se destaca na bacia Austral (Pedrazzini et al., 2002).

A Formação Springhill é descrita em território continental e em território "offshore". Três unidades em território continental são descritas na região da plataforma de Santa Cruz e parte da Terra do Fogo (Pedrazzini et al., 2002), ao passo que quatro unidades em território "offshore" são descritas na região da Ilha da

Terra do Fogo (Arbe *et al.*, 2002). As três unidades do território continental são descritas como: Springhill Inferior, chamado também Basal ou Continental; Springhill Médio ou Argiloso e Springhill Superior ou Marinho. Em território "offshore", as quatro unidades são: Hidra; Argo; Paloma e Carina.

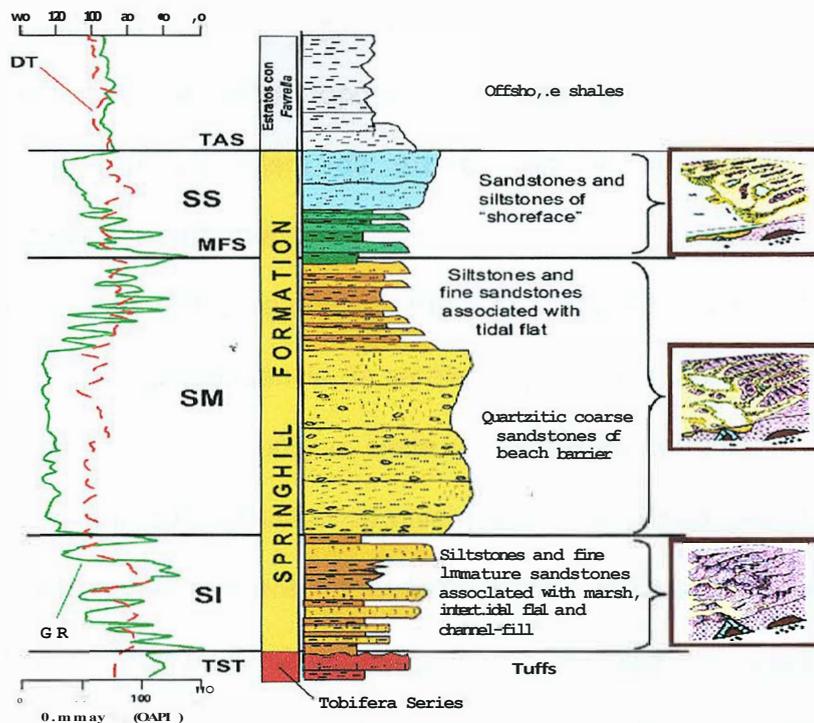


Figura 5 - Coluna estratigráfica da Formação Springhill contendo com informações geofísicas de sondagem (sônico em laranja, raios gama em verde e análise de litofácies). (Quattrocchio *et al.*, 2006).

A descrição realizada em território continental da unidade Springhill Inferior possui rápidas mudanças laterais na granulometria, predomínio de seqüências granodecrescentes, restos carbonosos de plantas e raízes nos níveis pelíticos. Isso indica condições de sedimentação fluvial a estuarina, e de planície fluvial a costeira.

No topo da unidade Springhill Inferior, uma etapa de subsidência é responsável pela sedimentação de pelitos com abundantes restos de plantas e que constitui a unidade conhecida como Springhill Médio, de provável origem marinha marginal ou de planície costeira ou pântano. Sua espessura é variável, geralmente entre 1 e 12

m, com continuidade suficiente para determinar o selo entre ambos os ciclos sedimentares.

A unidade Springhill Superior apresenta predomínio de arenitos glauconíticos com fragmentos de conchas. Em algumas posições da bacia, este ciclo se apresenta em fácies de granulometria fina que atuam como selo da unidade Springhill Inferior. Alguns altos topográficos onde se deram condições de estabilidade na subsidência, além de luz e oxigênio suficientes, ocorreram deposição de sedimentos carbonáticos.

Segundo Arbe *et al.* (2002), a unidade Hidra de idade Berriasiano-Valanginiano é descrita como uma megasseqüência de caráter regressivo e, por uma seção basal da fase transgressiva, começa com um limite de seqüência fortemente erosional - que corresponde a uma baixa relativa do nível base -, instalando-se, a seguir, um sistema entrelaçado fluvial que preenche vales amplos incisos correspondentes à última fase do trato de mar baixo. Com a subida do nível base e a instalação de um sistema transgressivo, os sedimentos distribuem-se nos vales na forma de canais sinuosos e em importantes depósitos de planície de inundação. Nessa situação, a espessura dos reservatórios decresce da base ao topo até que os vales estejam completamente inundados por um sistema lacustre/palustre dominado por argilitos, situação de máxima inundação do final do trato transgressivo.

A unidade Argo (Valanginiano Tardio-Hauteriviano) é composta de arenitos e argilitos desenvolvidos em diferentes tipos de depósitos, de estuarinos litorais a marinhos rasos. A unidade Argo possui as fácies comuns na Formação Springhill, que são interpretadas como um produto de intervenções climáticas que provocaram o deslocamento e deposição de quantidades abundantes de areias em um ambiente

marinho raso. Estes corpos de arenitos formam lobos maciços e são compostos de areias grossas interpretados como depósitos de trato de mar baixo.

Arbe *et ai.* (2002) descreveram a unidade Paloma de idade Hauteriviana como uma sucessão de arenitos maciços desenvolvidos durante um período de nível de mar baixo que precede depósitos de anti-praia, de baía e de estuário desenvolvidos durante período de subida de mar. Sobre os níveis de condensação desenvolvem-se pelitos de plataforma de trato de mar alto.

De idade Barremiana, a unidade Carina, assim como a unidade Paloma, é composta por uma sucessão de lobos arenosos maciços de trato de mar baixo, seguida de depósitos transgressivos de nível de mar alto com canais e fácies estuarinas (Arbe *et ai.*, 2002).

Os folhelhos descritos por Thomas (1949) - Estratos com Favrella - foram depositados concomitantemente ou logo acima da Formação Springhill. Eles consistem em um folhelho fossilífero cinza a cinza-amarronzado, intercalado por carbonatos com glauconitas na base. A espessura da unidade varia de 10 a 240m. A fauna encontrada consiste em cefalópodes *Streblitos*, *Favrella*, *Berrasela*, *Belemnopsis* e *Crioceras* e o Pelecypod *Inoceramus*. O foraminífero mais comum é o *Cristellaria*, *Polymorfina* e o *Ammobaculitos*.

A Formação Pampa Rincon ou *Inoceramus* Inferior e equivalentes (folhelhos com chert) de idade Barremiano-Aptiano (Natland *et ai.*, 1974) foram depositados sobre a Formação Springhill durante a fase de subsidência térmica (Biddle *et ai.*, 1986) formando uma cunha extensa e progradante de folhelhos e siltitos que recobrem o arco de Dungenes e aumentam a espessura em direção sudoeste (Sanchez, 1999).

Sobre a Formação Pampa Rincon, três unidades sedimentares podem ser caracterizadas: "marls" da Formação Nueva Argentina ou Margas Verdes, de idade de Aptiana; folhelhos da Formação Arroyo Alfa ou Inoceramus Medio, de idade Cenomaniana a Coniaciana; e folhelhos da Formação Cabeza de León ou Inoceramus Superior, de idade Coniaciana-Maastrichtiana (Harambour, 1998), que foram depositados abaixo de condições marinhas aeróbicas e têm sua espessura aumentada para sul e oeste, onde eles se interdigitam com os turbiditos de origem tectônica da Formação Cerro Toro e equivalentes (Sanchez, 1999).

Na região de Santa Cruz, a Formação Magallanes, que lateralmente é equivalente a várias outras formações já descritas (Figura 3), apresentou manifestações de hidrocarbonetos desde o início das pesquisas e da exploração da bacia Austral.

Miller & Cagnollatti (1998) apresentaram uma atualização do modelo estratigráfico para a porção inferior da Formação Magallanes (porção arenosa), baseada em informações obtidas na região do rio Santa Cruz e La Esperanza. Nesse trabalho, foi observado que a base da Formação Magallanes (unidade Magallanes Inferior) concentrava os reservatórios de gás e óleo na região da província de Santa Cruz. Tradicionalmente, estes reservatórios eram temporalmente localizados no início do Paleogeno, sendo os pelitos da Formação Palermo Aike localizados ao final do Cretáceo. Após o cruzamento de várias informações no banco de dados regional e estudos interdisciplinares, foi possível estabelecer o limite cronoestratigráfico para a Formação Magallanes, sendo definido no período do Neocretáceo ao Mioceno.

A Formação Magallanes foi subdividida em duas unidades: (1) Magallanes Inferior e; (2) Magallanes Superior. A unidade Magallanes Inferior, definida do

Neocretáceo ao final do Eoceno, possui a porção reservatório desta formação. Ela é caracterizada por conter pelitos de fácies pró-delta, arenitos marinhos marginais de fácies de canal, pelitos carbonosos de fácies de canal, arenitos marinhos de fácies de barra marinhas e pelitos e arenitos glauconíticos de fácies de plataforma externa.

4.3 Geologia Estrutural

As feições estruturais observadas na bacia Austral são caracterizadas por falhamentos - normais, transcorrentes e cisalhantes -, por dobras assimétricas, dobras causadas por inversão e estruturas compressivas características da zona dobrada (Diraison *et al.*, 2000).

Os falhamentos normais que ocorrem entre as direções NW e NNW foram formados durante o rifteamento do Triássico ao Neojurássico, sendo reativados durante as etapas de compressão Terciária que, por vezes, provocaram novos falhamentos subordinados, de direção W-E, com características cisalhantes e transcorrentes.

A bacia Austral pode ser dividida em quatro zonas morfoestruturais: zona de plataforma, zona de flexura ou talude, zona de bacia profunda e zona dobrada - ou faixa dobrada - (observar Figura 6 descrita por Schiuma, 2002).

A zona de plataforma possui espessura sedimentar entre 1000 e 2000m com fraca estruturação, predominando estruturas extencionais (NNE-SSO) que constituem os altos do embasamento. Horsts, grábens e semi-grábens são especialmente bem desenvolvidos nesta zona.

Representando a transição da antefossa (foredeep) para a zona de plataforma, a zona de Flexura ou Talude é caracterizada por uma maior

estruturação, com falhas normais (NW-SE}, desde o Jurássico, e com reativações no Cretáceo e Terciário (Figura 7).

A zona de Bacia Profunda corresponde à antefossa, com espessuras sedimentares chegando a 8000m. Tectonicamente é mais estruturada devido à proximidade com a cadeia andina.

A zona dobrada foi classificada em interna e externa. Nela, os sedimentos detríticos do Paleozóico ao Terciário foram elevados pelos eventos tectônicos compressivos andinos.

A faixa dobrada interna é caracterizada por conter afloramentos Paleozóicos, Jurássicos e Cretáceos e uma deformação compressiva intensa diferente da faixa dobrada externa, que possui afloramentos do Cretáceo ao Terciário, além de uma deformação cada vez mais suave para leste.

Ainda na faixa dobrada, são reconhecidos dois estilos estruturais dominantes: o primeiro encontra-se sobre as rochas do embasamento onde são observadas dobras assimétricas e por inversão (de pequeno a grande comprimento de onda); o segundo, sobre a cobertura sedimentar marcada pelas estruturas compressivas.

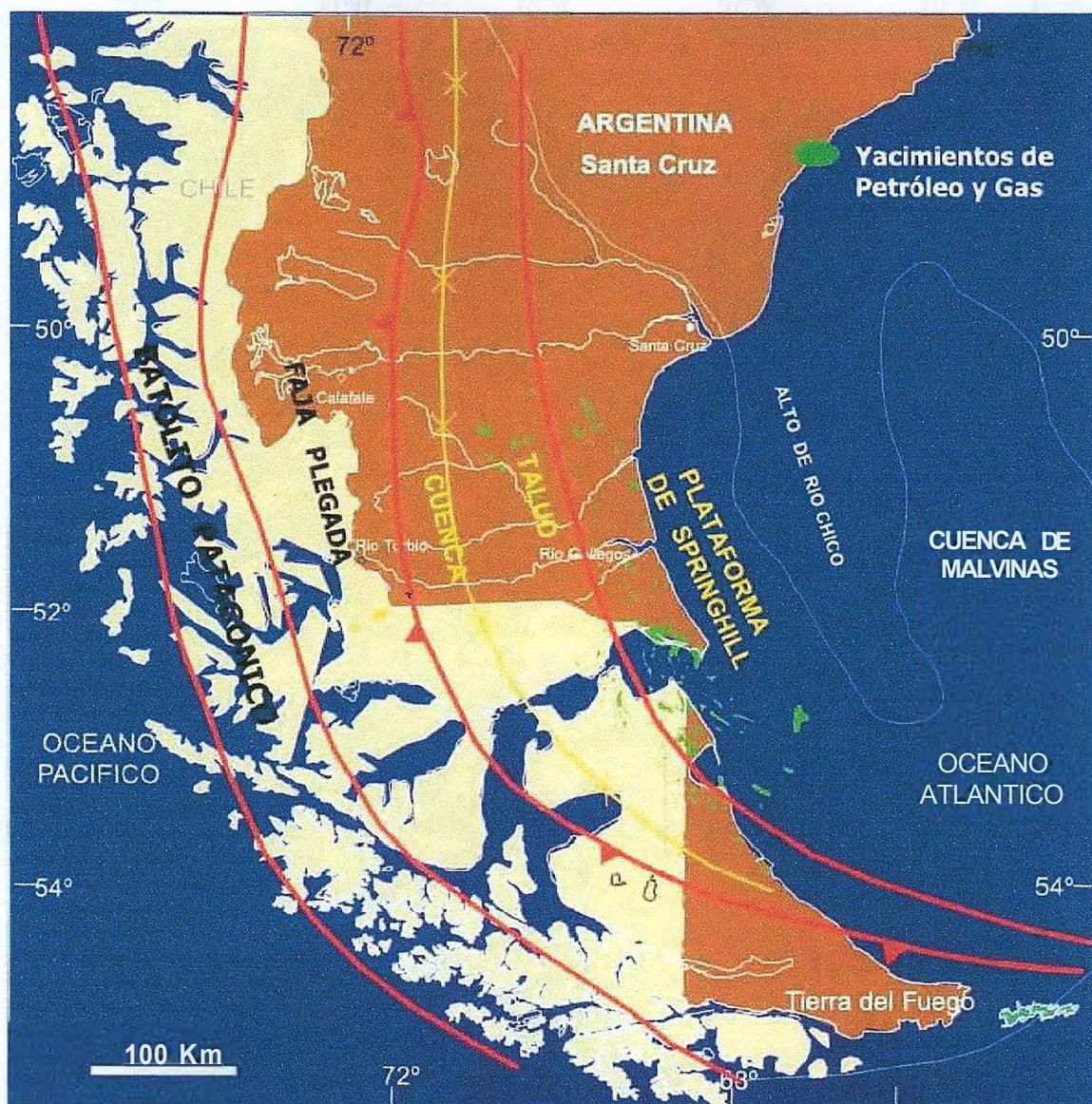


Figura 6 - Bacia Austral, contexto geotectônico, localização e geometria geral. As quatro zonas morto-estruturais são representadas por zona de plataforma (Plataforma de Springhill), zona de flexura ou talude (Talud), zona de bacia profunda (cuenca) e zona dobrada (Faja Plegada). (Schiuma, 2002).

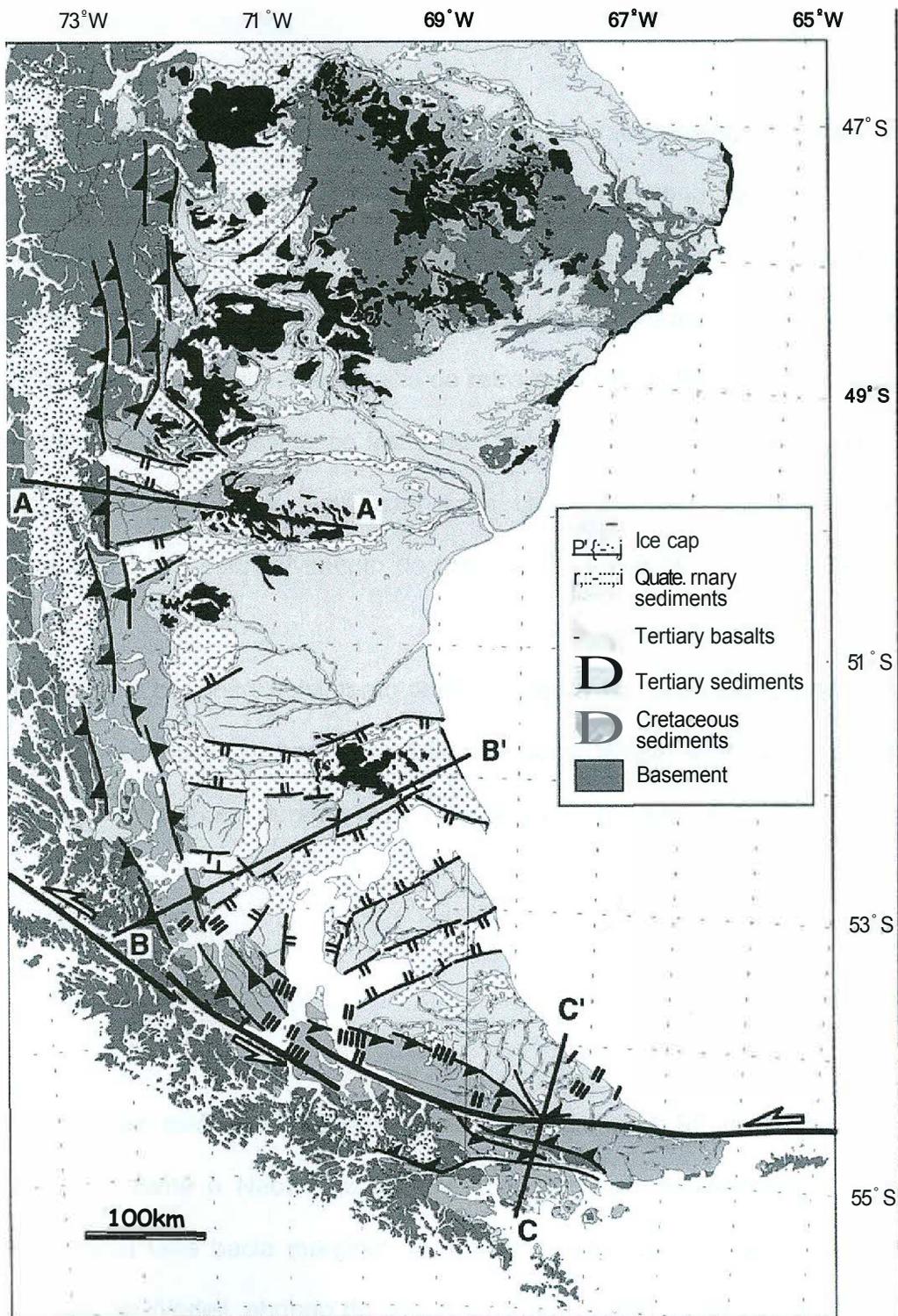


Figura 7 - Mapa geológico e estrutural da porção sul dos Andes e bacia Austral. O embasamento consiste em rochas metasedimentares do paleozóico, intrusões, ofiolitos e rochas vulcanoclásticas do Jurássico. As estruturas são empurrões, falhamentos transcorrentes (representadas por meia setas brancas indicando o movimento) e falhas normais (no símbolo os traços duplos representam o bloco baixo). Segundo Diraison (2000).

4.4 Geologia Histórica

A história da bacia Austral está intimamente relacionada com três etapas principais: (1) a primeira está vinculada à tectônica extensional, que se originou do meio ao final do Jurássico (etapa de rifte), tendo como consequência a fragmentação do Gondwana, a abertura inicial do Oceano Atlântico Sul e a formação da bacia (inicialmente a bacia de retro-arco Rocas Verdes); (2) a segunda, desenvolvida do Neojurássico ao início do Cretáceo, está associada a uma lenta subsidência ténica, etapa esta conhecida como pós-rifte; (3) a terceira está relacionada com o desenvolvimento de uma bacia "*fore/and*" no Neocretáceo e no Terciário.

A evolução e o desenvolvimento destes cenários foi consequência da interação entre as placas Sulamericana e Antártica. A subsidência se iniciou pelo sul, no Neojurássico e continuou durante todo o Cretáceo e Terciário, até o Plioceno.

4.4.1 PRIMEIRA ETAPA: RIFTE

Esta etapa está associada à ruptura inicial do setor SE do Supercontinente Gondwana, durante o Neotriássico e meados do final do Jurássico. A extensão contínua gerou uma bacia marginal de antearco, com a formação de um oceano interno, Mar de Wedell, abrindo do sul para o norte (Stern, 1980; de Wit and Stern, 1981) (Figura 8). A inundação marinha inicial que avançou desde o sul e o sudeste, como consequência do suave afundamento térmico, deu lugar ao desenvolvimento de depósitos de argilitos marinhos, dispostos em camadas de algumas dezenas de

metros contendo fauna de amonitas e belemitas, interestratificados entre as vulcânicas da Formação Tobífera.

Numa etapa inicial, rochas magmáticas e vulcânicas intrudiram em uma extensa faixa da margem continental Pacífica do Gondwana; como resultado, desenvolveu-se um discreto número de hemigrábens com orientação predominante NW-SE, separados por segmentos de embasamento. Estas feições facilitam o vulcanismo da Formação Tobífera. Sedimentos vulcânicos e vulcanoclásticos marcam o sistema sin-rifte da Formação Tobífera Inferior. A essa etapa estão associados os complexos ígneos máficos, como lavas almofada, diques máficos e ofiolitos, denominados Rocas Verdes.

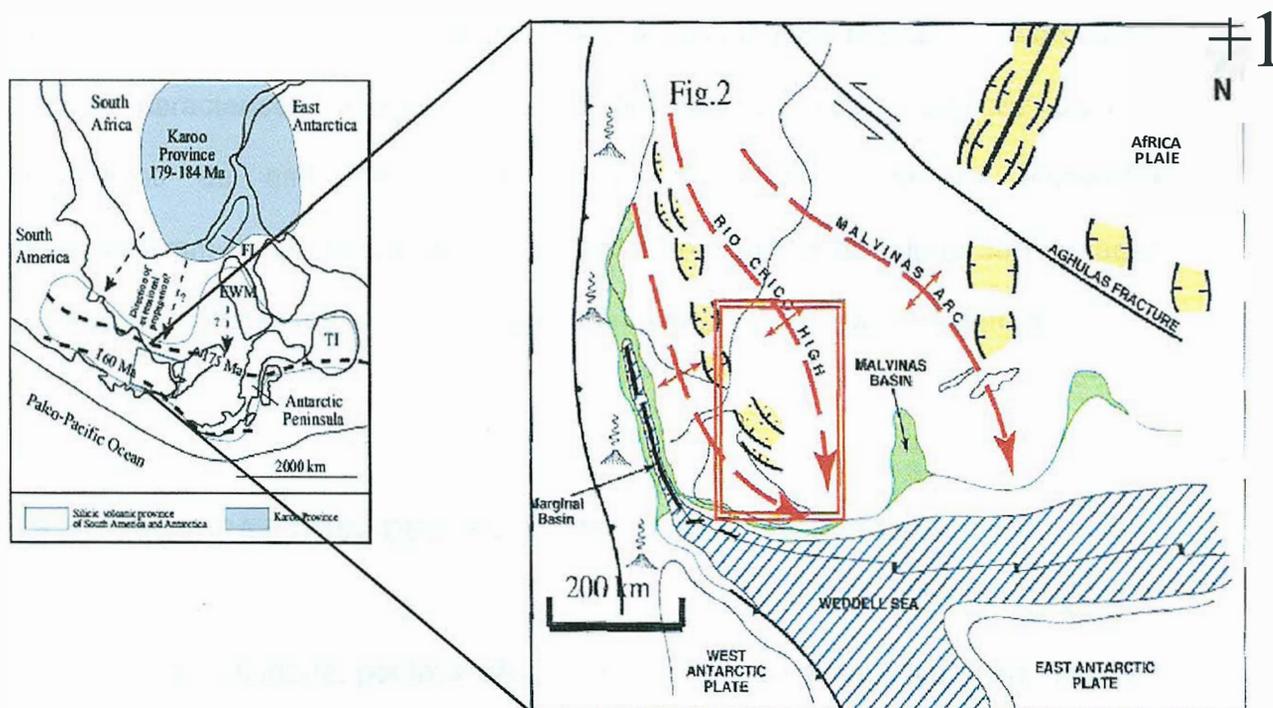


Figura 8 - Fase rifte da bacia Austral e abertura do Mar de Wede/1 (Fildani & Hess/er, 2005)

Estes hemigrábens se concentraram próximos ao Alto Rio Chico, onde ocorreu uma erosão do embasamento Paleozóico, servindo de fonte de sedimentos para a bacia. A subida do nível do mar durante o clímax da atividade vulcânica, seguida de

seqüências sedimentares transgressivas entre 157 e 153 Ma, gerou a deposição das fácies de arenito com o nome de Formação Springhill (Robbiano *et. ai.*, 1996) (Figura 9).

4.4.2 SEGUNDA ETAPA: SUBSIDÊNCIA TÉRMICA

Esta etapa se inicia no final do período de abertura da bacia retroarco, com a crosta oceânica sendo formada (Figura 9).

Durante o Neojurássico e o início do Cretáceo, o amplo setor da plataforma Sul-americana desenvolvido ao leste e a depressão da bacia retroarco tiveram como principal característica a deposição de sedimentos elásticos e "by-pass" para os sedimentos de ambientes fluviais e marinhos rasos. Nesses ambientes desenvolveram-se os depósitos da Formação Springhill, e de talude da Formação Zapata, todos dispostos em relação discordante sobre a Formação Tobífera.

4.4.3 TERCEIRA ETAPA: DESENVOLVIMENTO DA BACIA "FORELAND"

Uma vez abortada, por inversão, a bacia retro-arco, ocorreram dobramentos e erosão parcial de seus depósitos, como consequência de processos compressivos durante o Neocretáceo. Estes processos reativaram as antigas falhas da fase rifte e um novo sistema de falhamentos subordinados com orientação E-W. Além disso, afetaram intensamente o arco vulcânico e a região imediatamente a leste, iniciando a formação da bacia de antepaís (Figura 9).

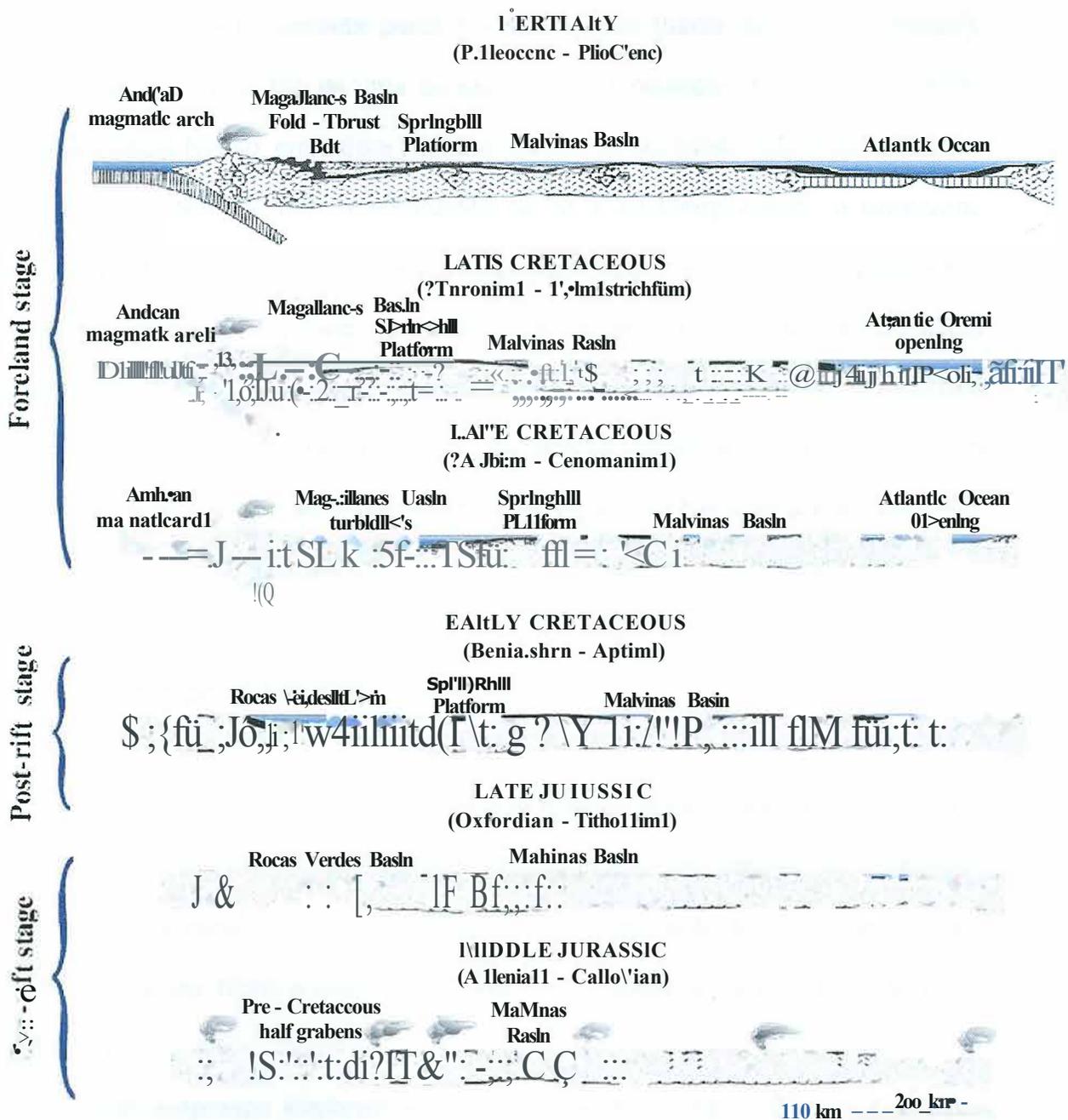


Figura 9 - Evolução tectônica da bacia Austral (modificado de Galeazzi, 1994).

Esta etapa de inversão está relacionada com o início do ciclo Patagônico - que é responsável pela continentalização do setor norte da bacia - correspondendo a uma aceleração na velocidade de convergência, reconhecida em toda a margem do Pacífico, desde a Colômbia até os Andes Austrais (Ramos, 1999); posteriormente, entre o final do Cenomaniano e o início do Coniaciano (96-84 Ma), ocorre o

fechamento da bacia formada pelas Rochas Verdes (bacia de "Rocas Verdes"), culminando com a colisão de uma dorsal oceânica vinculada com o platô basáltico Adakita Puesto Nuevo, entre 85 e 76,7 Ma (Ramos *et al.*, 1994; Nulo *et al.*, 2002).

Imediatamente a leste e a noroeste da faixa em soerguimento, a plataforma estável da bacia começa a subsidir em resposta à carga resultante do empilhamento tectônico, mudando a polaridade da área de depósito sedimentar e tendo como consequência a formação do antefosso da bacia de antepaís, onde se depositaram as maiores espessuras sedimentares conhecidas na bacia Austral. O eixo do antefosso migrou para o setor estável do antepaís entre o Neocretáceo e o Mioceno.

4.5 Geologia do Petróleo.

O progressivo soterramento de seções com condições oleogénicas durante desenvolvimento da bacia de antepaís, principalmente nas regiões de "foredeep", favoreceu não somente o amadurecimento como a migração e o carregamento dos reservatórios de hidrocarbonetos de diferentes idades e litológicas (arenitos e vulcânicas).

Várias empresas exploram a região da bacia Austral, e têm na Formação Springhill o seu principal horizonte de produção de hidrocarbonetos (Gonzalez, 1998). As principais empresas que exploram a região da bacia em questão são: ENAP, Total Austral, YPF, Amoco, Shell e Petrobras.

Segundo Peroni (2002), até o ano 2000, na bacia Austral, foram descobertas reservas da ordem de 1.097 MM m³ de petróleo e condensados e pouco mais de

1.133 MMM m³ de gás, sendo o volume das reservas de óleo e gás, em termos energéticos, equivalentes.

A exploração da bacia na Argentina, em termos cronológicos, foi feita da plataforma estável continental em direção à zona de bacia profunda, sendo a área de plataforma continental a mais madura. A área de plataforma estável continental está sendo explorada há mais tempo, tendo, até 2002, 1100 poços perfurados (Peroni, 2002). A exploração na área de talude e bacia profunda se tornou mais intensa a partir da década de 1990, mas desde a década de 1970 já haviam sido descobertas grandes acumulações de hidrocarbonetos, principalmente os gasosos.

A bacia Austral tem, como principais, os seguintes sistemas petrolíferos: (1) Inoceramus Inferior-Springhill; (2) Inoceramus Inferior-Magallanes Inferior e o sistema (3) Tobífera-Tobífera/Springhill.

O mais importante é o sistema petrolífero Inoceramus Inferior-Springhill, por ser o mais bem estudado e o que possui a grande maioria das reservas da bacia. O sistema é composto pelos reservatórios da Formação Springhill e os localizados na Formação Tobífera Superior. São exemplos os reservatórios El Condór, Cerro Redondo, Faro Vírgenes, Canadón Salto, Etancia La Maggie, Cerro Norte, Océano, Dei Mosquito, entre outros. As seções pelíticas do intervalo Springhill têm características geoquímicas comparáveis às do Inoceramus Inferior, mas com maior quantidade de material orgânico terrígeno, o que indica a possibilidade de maior geração de gás.

O sistema petrolífero Inoceramus Inferior-Magallanes Inferior foi identificado na província de Santa Cruz, e é considerado um sistema com grande potencial para hidrocarbonetos.

O sistema petrolífero Tobífera-Tobífera/Springhill é composto por argilas geradoras intercaladas na seção inferior da série Tobífera, o que pode indicar dois tipos de reservatórios: um tipo da série Tobífera - com porosidade primária e secundária por fraturamento dentro do preenchimento vulcanoclástico dos grábens - e o outro, tradicional, da formação Springhill - preenchido através de fraturas.

4.5.1 ROCHA GERADORA E GERAÇÃO

A geração de hidrocarbonetos na bacia Austral começou há aproximadamente 75 milhões de anos durante o Neocretáceo. A expulsão dos hidrocarbonetos da rocha geradora se iniciou há 50 milhões de anos, durante o início do Terciário (Paleogeno), nas regiões profundas da bacia.

Na bacia Austral, as reservas de hidrocarbonetos dividem-se em reservas de óleo (30%) e gás (70%). O motivo dessa alta quantidade de gás na bacia pode ser explicado pelo "cracking" de petróleo em gás na rocha geradora, antes de os hidrocarbonetos serem expulsos. Outro motivo que explica a relação entre gás e óleo é a qualidade da matéria orgânica, que teria maior potencial para a geração de gás. Em alguns casos encontram-se acumulações de óleo sem gás, que podem ser explicadas pela perda de gás do reservatório.

Segundo Pittion *et al.* (1999), a rocha geradora mais importante da bacia está concentrada no início do Cretáceo. Nas fácies continentais da Formação Springhill existem intercalações finas de folhelho, com espessura de 1 a 5 metros, e com níveis laminados de composição carbonosa que possuem um bom potencial gerador, indicado por muitos parâmetros de Rock-Evai (Espitalié *et al.*, 1977).

Através de análises geoquímicas, é possível verificar que a matéria orgânica presente possui valores de carbono orgânico total (COT) da ordem de 2 a 6%, chegando, em alguns pontos, a alcançar 25% (Descalli *et al.*, 1992). O índice de hidrogênio da matéria orgânica está entre 300 e 700 mg/g e o seu potencial médio S₂ entre 7 e 20 kg/t. Essas características da matéria orgânica provavelmente estão relacionadas à presença da exinita, uma alga lacustre, o que indica que os pelitos foram depositados em um sistema palustre associado a uma planície de inundação. Nessa fácies prevaleceu o ambiente redutor. Mesmo sendo o sistema em questão, em geral, associado à matéria orgânica de baixa qualidade - provinda de plantas terrestres, nesse caso - a presença de exinitas associadas ao ambiente redutor promoveu a boa qualidade da matéria orgânica formadora do petróleo.

No setor oriental da bacia encontram-se os depósitos da fase lacustre, do início da formação da bacia, associada às primeiras etapas da formação dos hemigrábens. Nos níveis basais da Formação Tobífera foram encontrados sedimentos continentais finos equivalentes aos da Formação Springhill, com boas características geradoras. Os valores de COT estão entre 1% e 7%, o S₂ de 1 a 26 kg/t e o índice de hidrogênio, compreendido entre 70 e 350 mg/g (Cagnolatti *et al.*, 1996).

Na seção marinha da Formação Springhill há camadas finas de pelitos com espessura de 1 a 10 m, principalmente no topo da formação. As análises geoquímicas mostram um potencial gerador fraco, mesmo a matéria orgânica sendo marinha. Os valores de COT são da ordem de 0,4% a 0,9%, os de S₂ de 0,7 a 2 kg/t, e o índice de hidrogênio, de 100 a 300 mg/g (Pittion *et al.*, 1999).

Os folhelhos marinhos da Formação Inoceramus Inferior e seus equivalentes possuem de 50 a 150 metros de espessura, com boa característica geradora de

rochas mãe do tipo li. Os maiores valores de COT alcançam 2% e os valores médios são superiores a 8%. O S₂ varia entre 1,5 e 10kg/t e o índice de hidrogênio está entre 150 e 550 mg/g. A profundidades maiores que 3 km, observa-se a diminuição dos valores de S₂ e do índice de hidrogênio, o que é um indicativo de que ali a matéria orgânica foi, em sua maioria, consumida na geração de hidrocarbonetos. A matéria orgânica da formação Margas Verdes tem, em sua seção inferior, valores similares aos da formação Inoceramus Inferior, possuindo bom potencial de geração.

Nas unidades citadas, a disposição da matéria orgânica pela bacia está relacionada às camadas que se depositaram em anoxia e também à variação do nível eustático que permite a sucessão dos semiciclos transgressivos. Na Tabela 1, a seguir, as características geoquímicas das principais rochas geradoras da bacia Austral são apresentadas.

Tabela 1 - *Características geoquímicas das principais rochas geradoras da bacia Austral.* (Pittion et al., 1999).

Formação	TOC (%)	HI (m ² /t)	S ₂ (kg/t)	Tipo dominante	Potencial	Espessura
Margas Verdes (parte inferior)	0,5-1,5	150-450	1 - 5	II - m	médio	100-150
Margas Verdes (rico organicamente)	1,5-2,0	350-550	6 - 11	II - III	bom	20-30
Inoceramus Inferior	0,8-2,0	150-400	1,5 - 5	II - III	médio a bom	50-150
Springhill - Folhelhos Marinhos	0,4-1,0	100-300	0,7 - 2	III	baixo	1-10
Springhill - Folhelhos Continentais	2 - 2,5	300-700	7 - 5,4	II - m	bom	1-5

4.5.2 MIGRAÇÃO

A migração na bacia Austral ocorre lateralmente e verticalmente. A migração lateral (Figura 10) ocorre principalmente a partir de oeste, através dos reservatórios

da Formação Springhill, que atuam como condutos principais para outros reservatórios da Formação Springhill e da Formação Tobífera. A migração vertical ocorre principalmente através dos falhamentos e dos deslizamentos que ocorrem próximo à faixa deformada.

Na bacia Austral, as fácies com conteúdo orgânico na janela de óleo - como a da formação Inoceramus Inferior - e os reservatórios da Formação Springhill estão próximos, permitindo o bom funcionamento do sistema petrolífero com uma migração lateral (Pittion *et al.*, 1999).

Como não existem níveis de rochas reservatórios diretamente relacionados aos níveis orgânicos da Formação Margas Verdes, espera-se que haja apenas uma migração vertical da "cozinha de geração" para os níveis de arenitos, que são considerados os reservatórios mais jovens da Formação Springhill (Villar *et al.*, 1993).

No setor ocidental do Chile, os grábens da Formação Tobífera estão suficientemente maduros para haver pequenas acumulações que provavelmente foram geradas a partir dos níveis potenciais da Formação Springhill continental. Esta, apesar de possuir matéria orgânica lacustre, não possui a capacidade de expulsão para rocha reservatório, não formando, assim, um sistema petrolífero.

Os reservatórios litorais da Formação Springhill estão associados a seqüências deposicionais distintas e a distribuição das fácies reservatório de cada uma delas é importante para estabelecer uma via contínua de migração. A distância de migração é considerada entre média e longa, entre 20 e 200 km na bacia Austral.

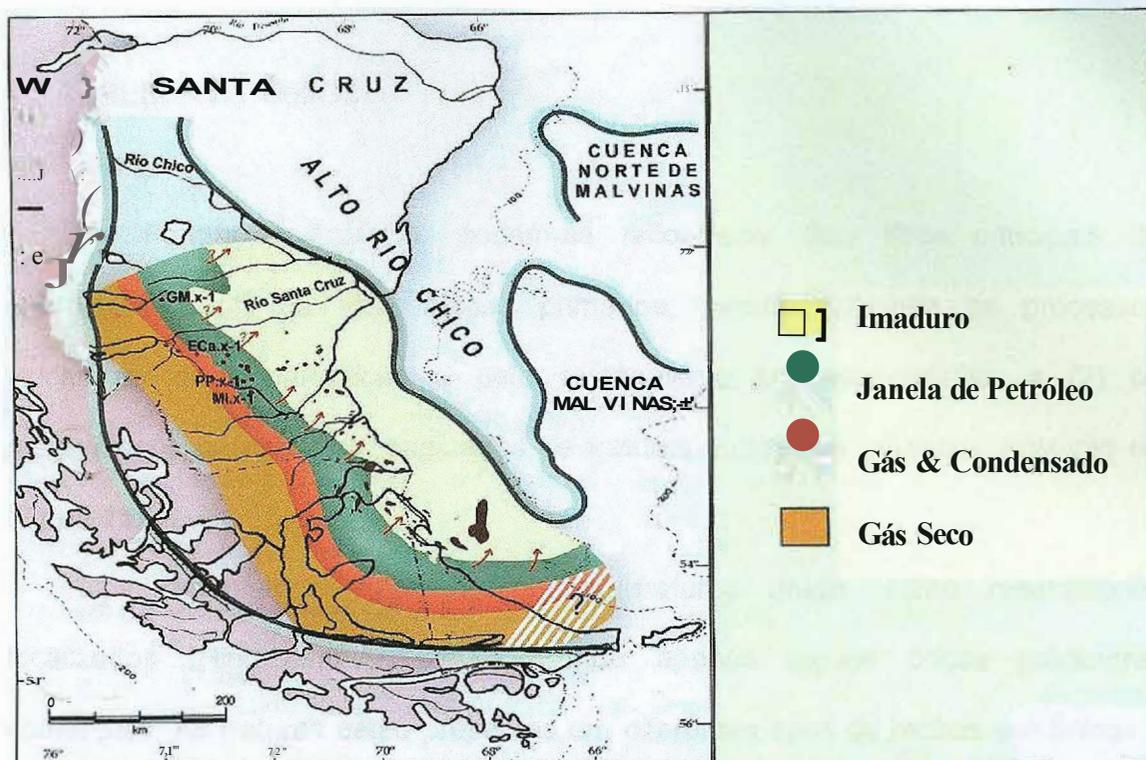


Figura 10 - Principais características do sistema petrolífero *Inoceramus Inferior* (*Springhi/1* e *Magal/anes Inferior*) da bacia Austral e distribuição atual da janela de geração de hidrocarbonetos. (Peroni et al., 2002).

4.5.3 TRAPEAMENTO

Na bacia Austral, o trapeamento é principalmente estrutural, possuindo blocos rotacionados, geralmente associados a antigas falhas no embasamento, que surgiram no desenvolvimento da Formação Tobífera (hemigrábens). Por outro lado, existe trapeamento de caráter estratigráfico em alguns reservatórios, especialmente para as fácies litorâneas da Formação Springhill (acunhamentos sobre a Formação Tobífera). Além desses dois modelos de trapeamento ocorrendo de forma isolada, existe, em menor escala, um trapeamento estrutural e estratigráfico (Pittion et al., 1999).

4.5.4 RESERVATÓRIOS

Na Formação Tobífera, podem-se reconhecer dois tipos principais de reservatórios: (1) os reservatórios primários, gerados durante os processos vulcânicos de acomodação e pelo resfriamento pós-acomodação; e (2) os reservatórios secundários, originados de fraturas tectônicas (observar exemplo na Figura 11).

Nos reservatórios secundários, as fraturas atuam como reservatórios localizados (Hinterwimmer, 2002), sendo apenas alguns poços produtores comerciais. As fraturas estão presentes em diferentes tipos de rochas vulcânicas - como os ignimbritos e riolitos -, conformando, assim, diferentes tipos de fraturas, podendo ser micro ou macrofraturas, subverticais e/ou subhorizontais, com textura cataclástica ou com trajetórias caóticas interconectando cavidades. Como exemplo, aponta-se o reservatório Punta Loyola, que é um pequeno reservatório na Formação Tobífera. Nesse reservatório, de onze poços perfurados até 2002, somente um tomou-se produtivo.

Como no caso dos reservatórios do tipo secundário na Formação Tobífera, os reservatórios primários na mesma formação são constituídos por diferentes tipos de rochas, como ignimbritos, riolitos maciços ou brechados. Variando entre 15% e 35%, em média, o índice de porosidade desses reservatórios é satisfatório.

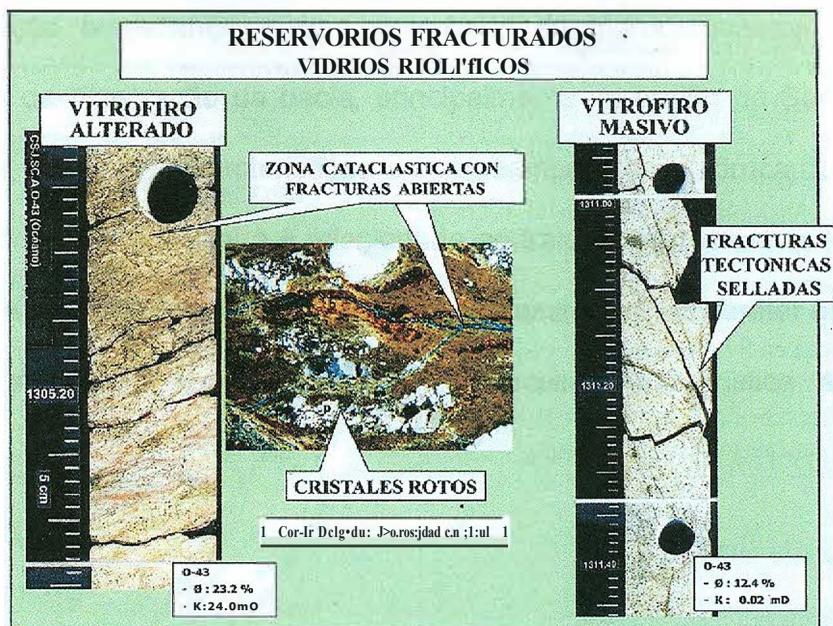


Figura 11 - Reservatório em fraturas cataclásticas em rochas riolíticas. (Hinterwimmer, 2002).

A Formação Springhill pode ser estudada melhor se dividida em sua parte continental e sua área "offshore".

Na parte continental da Formação Springhill, há uma variação muito grande nos valores de porosidade e de permeabilidade. Isso ocorre devido à alta variedade granulométrica, à presença de argilas, à cimentação da rocha e ao nível de compactação.

A qualidade do reservatório na formação é influenciada pela compactação e pela cimentação. Os membros inferiores e superiores apresentam índices altos de cimentação. No caso do membro superior, o cimento calcítico é o mais comum. Os eventos diagenéticos que ocorrem na formação são: compactação, crescimento secundário de quartzo, caulinitização e calcificação. A caulinita é o argilomineral mais presente nos arenitos da Formação Springhill.

Os reservatórios mais importantes da bacia estão na Formação Springhill: "offshore", e também nela estão os condutos de migração dos hidrocarbonetos até as rochas selantes.

A Formação Magallanes - com ocorrência de hidrocarbonetos conhecida desde o início da exploração da bacia, principalmente na região de Santa Cruz - possui as três principais características de trapeamento dos hidrocarbonetos em seus reservatórios: (1) a primeira é relacionada ao trato transgressivo que é do tipo estrutural; (2) a segunda também é de trato transgressivo e é de caráter combinado, tanto estrutural quanto estratigráfico; (3) a terceira característica é do tipo estratigráfico.

5 GRAVIMETRIA

5.1 Introdução

O método gravimétrico tem como o objetivo principal, detectar as mudanças de densidades laterais existentes entre os corpos de rocha, para tal utiliza a leitura do campo gravitacional terrestre, a qual incluirá anomalias.

O método é utilizado para o estudo de pequenas e grandes áreas, em escala de detalhe a escala regional de mapeamento. Pode ser executado em terra, oceano ou ar.

De uma maneira geral a interpretação de gravimetria é complicada, pois a ambiguidade é um fator muito comum, como por exemplo: os efeitos gravimétricos de alguns diferentes corpos de massa gerando a mesma anomalia de apenas um corpo de massa. E esta, é a chave para um bom interprete deste método conseguir diferenciar os diferentes tipos de anomalia.

O método é aplicado tanto para prospecção mineral como também para a prospecção de hidrocarbonetos. No caso de hidrocarbonetos, um bom exemplo, é a visualização de contraste negativo de densidade entre um domo de sal e os sedimentos em sua volta, a interpretação correta promove a compreensão das armadilhas estruturas que armazenam o petróleo.

5.2 Teoria básica

O campo gravitacional (\vec{g}) em um ponto do espaço é definido, pela força gravitacional (\vec{F}) dividido por sua massa (m_1).

$$\vec{g} = \frac{\vec{F}}{m_1} \quad (5.1)$$

A força gravitacional exercida em uma massa (m_1) por outra massa (m_2) é dada pela lei da gravitação universal de Newton.

$$F = G \frac{m_1 m_2}{r^2} \hat{r} \quad (5.2)$$

A constante gravitacional (G) determinada por Cavendish é igual a $6,672 \times 10^{-8}$ $\text{cm}^3 \text{g}^{-1} \text{s}^{-2}$ (sistema cgs), a massa m_1 e m_2 estão em gramas, r é a distância entre m_1 e m_2 em centímetros, e \hat{r} é o vetor unitário ao longo da linha que liga m_1 e m_2 de sentido m_1 para m_2 . A magnitude F é

$$F = G \frac{m_1 m_2}{r^2} \quad (5.3)$$

Logo, o campo gravitacional resultante de uma massa pontual é:

$$\vec{g} = \frac{\vec{F}}{m_1} \quad (5.4)$$

$$\vec{g} = \frac{G m_2}{r^2} \hat{r} \quad (5.5)$$

A unidade do campo gravitacional é unidade de força por unidade de massa ou *dina* por *grama*, também conhecida como *Gal*. Em gravimetria comumente é utilizado miliGal (mGal).

Se a única força que atua sobre a massa m , é a força da gravidade, o campo gravitacional g é igual a aceleração \hat{a} da massa de teste m , em relação a localização de m_2 , e se a massa m_2 é muito maior que a massa m_1 , temos a seguinte expressão derivada de segunda lei de Newton, $f_r = \gamma \frac{m_1 m_2}{r^2}$

Segundo West (1992), o campo gravitacional da Terra tem sido incorretamente chamado de aceleração da gravidade, pois a massa do planeta Terra é infinitamente maior que qualquer massa de teste utilizada para medir o campo gravitacional. A aceleração da gravidade se refere a aceleração de um corpo que está em queda livre influenciada pelo campo gravitacional terrestre. A aceleração é a propriedade do movimento de um corpo. Campo gravitacional é a força gravitacional atuando sobre este corpo. O campo gravitacional e a aceleração pode ou não ser igual, porém fisicamente eles possuem diferentes conceitos.

A magnitude do campo gravitacional pode ser calculado através da equação (5.5) se for assumido que o planeta Terra é um esfera de densidade uniforme. Newton provou que uma esfera com distribuição de massa esfericamente simétrica, possui o mesmo campo gravitacional de uma massa pontual (com a mesma massa da esfera) localizada no centro da primeira.

Usando a massa da Terra igual a $5,967 \times 10^{27}$ gm e o raio equatorial de 6.378×10^5 cm, o campo gravitacional é de 979,868 Gal, contudo utilizando o raio polar de 6.356×10^5 cm, o campo gravitacional fica em 986,663 Gal. Estas aproximações indicam que o campo gravitacional muda muitos Gals em função da forma da Terra.

Utilizando o princípio de superposição aplicado ao campo gravitacional. O campo em um ponto no espaço devido a uma série de massas é o vetor soma dos campos gravitacionais individuais dessas massas.

Matematicamente com a distribuição de massas de tamanhos finitos, g e m_2 na equação (5.5) são substituídos pelos diferenciais \hat{g} e \hat{m}_2 .

$$\vec{u}g = G \hat{r} \hat{m}_2^2 \quad (5.6)$$

$$\hat{m}_2 = P \hat{v} \quad (5.7)$$

$$\vec{u}g = \frac{G P \hat{v}}{r^3} \quad (5.8)$$

Onde a densidade do ponto posicionado em r é dada por P e \hat{v} é o volume elemento.

O componente vertical do campo gravitacional é dado por.

$$\partial g_z = G \frac{z P \hat{v}}{r^3} \quad (5.9)$$

onde, z é a componente vertical *der*.

A integração da equação (5.9) só é passível com corpos de simples geometria e distribuição de densidade.

West (1992), coloca que relações estão sendo desenvolvidas na teoria do potencial gravitacional, para que se possa fazer as determinações do campo de forma menos complicadas do que a forma dada pelas equações (5.8) e (5.9) e também equações andam sendo desenvolvidas para o cálculo de campo gravitacional de um corpo com forma irregular, equações estas utilizadas no desenvolvimento de algoritmos para uso em computadores.

O calculo do efeito da gravidade em um corpo com forma e densidade conhecida é única e acurada e pode ser facilmente calculado, contudo o calculo inverso onde se possui a anomalia gravimétrica e se tenta calcular a forma do corpo e sua densidade não é único. O problema ocorre, quando o elemento de massa é dividido em duas partes, a densidade P e o volume \hat{v} , observar equação (5.7). Quando o modelo do efeito da gravidade é calculado, duas incógnitas têm que ser determinadas, a densidade e a geometria, proveniente de apenas uma, a anomalia gravimétrica, por isso um numero infinito de soluções é gerado.

Complementando, a gravidade g , é definida como resultado do campo gravitacional (g) e a aceleração centrífuga devido a rotação da Terra.

$$\vec{g}_e = \vec{g} + \vec{a}_c \quad (5.10)$$

A medida da magnitude de g , g , é chamada de medida de gravidade.

A medida de magnitude da aceleração centrífuga da Terra é dado por $(-a_p w^2)$, onde a_p é comprimento da linha que liga o eixo de rotação da Terra ao ponto p na superfície do planeta e w é a velocidade angular de $7,29212 \times 10^{-5}$ rad/s. Observe que a_p varia de 6378×10^5 cm no equador à 0 cm nos polos, e a aceleração centrífuga varia de $-3,392$ Gal no equador a 0 Gal nos polos.

5.3 Medidas de gravidade

Neste tópico serão mostrados os equipamentos e os procedimentos de medida de gravidade.

5.3.1 GRAVIMETROS

É o instrumento usado para medida da componente vertical da aceleração da gravidade. Os gravímetros são classificados de acordo com os tipos de medidas, absolutos ou relativos e de acordo com o tipo de levantamento, terrestre, aéreo ou marítimo.

5.3.1.1 Gravímetros absolutos

São gravímetros utilizados apenas em levantamentos terrestres, medem o valor real da gravidade no ponto de medida. Existem dois tipos, portáteis e fixos. Os portáteis são utilizados em levantamentos terrestres e os fixos são utilizados em laboratório.

Para estes gravímetros, duas metodologias de medida são utilizadas, Free-Fall e Rise-and-Fall.

O método Free-Fall consiste em: um feixe de laser que é partido em dois por um semi-refletor, refletido de volta por espelhos situados em direções ortogonais e re-combinados criando um padrão de interferência. Como um dos espelhos cai em queda-livre, o padrão de interferência muda ao longo do tempo o que permite determinar o tempo de queda que é proporcional à gravidade local, precisão de 0.005 - 0.01 mGal e, não são utilizados em prospecção gravimétrica.

Na metodologia Rise-and-Fall, uma esfera de vidro é projetada para cima e retorna a posição inicial. Durante o trajeto a esfera cruza dois feixes de luz que

registram precisamente o tempo de passagem. O tempo é proporcional à gravidade, Precisão de 0.005 - 0.01 mGal.

5.3.1.2 Gravímetros relativos

São gravímetros utilizados em levantamentos terrestres, marítimos e aéreos. Medem a variação em relação a uma posição em que um valor é previamente conhecido. Em levantamentos aéreos ou marítimos são colocados em uma plataforma estabilizadora.

São quatro os principais tipos de gravímetros relativos: gravímetros zero-length-spring; gravímetros marítimos de fundo, gravímetros marítimos de bordo e gravímetros aéreos de bordo.

Os gravímetros de bordo tanto aéreo quanto marítimos, são montados sobre plataformas estabilizadoras, são de operação rápida e comumente são utilizados em conjunto com levantamentos sísmicos.

No caso dos gravímetros zero-length spring ou o de fundo (marítimo), possuem formas de trabalho similares. Uma massa suportada por uma barra horizontal é presa a uma mola. As variações na gravidade afetam a massa e alteram o comprimento da mola. O gravímetro zero-length spring é o principal instrumento de pesquisa gravimétrica, já o gravímetro de fundo possui restrições em relação a profundidade devido aos cabos, é operado remotamente e possui operação lenta.

5.3.2 PROCEDIMENTOS PARA A TOMADA DE MEDIDAS DE GRAVIDADE UTILIZANDO GRAVIMETROS

O valor de gravidade obtido em uma estação de leitura, corresponde ao somatório dos efeitos de todos os corpos, representados por massas de densidade diferentes, situado abaixo ou nas proximidades do ponto de leitura.

Para se obter o valor de gravidade em uma estação de campo, alguns procedimentos são tomados. É necessário referenciar esta estação a um ponto com conhecido valor de gravidade (valor de g_e). Isto só é possível graças a uma rede internacional de estações de gravimetria, construída a partir de leituras com gravímetros de gravidade absoluta, baseados no princípio da queda livre. Esta rede possui como datum gravimétrico mundial, o datum IGSN-71, atualmente com quase 2000 estações de primeira ordem e, no Brasil, a Rede Gravimétrica Fundamental Brasileira, coordenada pelo Observatório Nacional, tem atualmente cerca de 600 estações implantadas, sendo 20 de primeira ordem.

Para se realizar o levantamento as leituras devem seguir a seguinte rotina: leitura na estação base, com valor de gravidade g_{ez} conhecido ou a ser referenciado; leitura na estação ou estações de campo; e por fim a leitura na estação base novamente. O motivo para a ida e volta na estação é somente para que as correções de maré e de drift do equipamento sejam realizadas. A leitura realizada no campo, reflete somente as divisões de escala do gravímetro, sendo portanto relativas, toma-se indispensável transformá-las em valor de gravidade g_{el} , para permitir assim, que as correções ou reduções de gravidade necessárias sejam realizadas.

$$g_{ef} = (dr_f \cdot k_f + tc_f + dc_f) - (dr_1 \cdot k_1 + tc_1 + dc_1) + g_{el} \quad (5.11)$$

, onde: $g_{,,}$ = valor de gravidade na estação de campo; $g_{,,1}$ = valor de gravidade na estação base; dr = leitura do gravímetro; k = constante do gravímetro; te = correção de maré e; de = drift do equipamento. Os símbolos representados pela letra f e I representam estações de campo e base respectivamente.

O processamento de gravimetria envolve uma seqüência de procedimentos que visa à redução dos dados observados, ou seja, colocá-los numa forma adequada ao tratamento e à interpretação. Para tanto, são aplicadas correções, que iremos ver no próximo tópico, as quais eliminam os vários componentes que afetam o valor medido, para obter apenas aquele proveniente do "efeito geológico" (variações laterais de densidade).

Desse modo, são fundamentais o posicionamento e a numeração de cada ponto de amostragem, a velocidade de deslocamento do sensor (no caso de levantamentos com plataforma móvel), a altimetria (ou batimetria) no ponto de amostragem, a data da aquisição dos dados, além dos valores da grandeza de interesse (dados brutos).

5.4 Correções ou reduções dos valores de gravidade

Antes de os resultados de um levantamento gravimétrico poderem ser interpretados, é necessário proceder à correção de todas as variações do campo gravimétrico da Terra que não resultam de diferenças de densidade da sub-superfície. Este processo é conhecido por correções ou reduções dos valores de gravidade. As correções normalmente realizadas serão descritas a seguir.

5.4.1 CORREÇÃO DE DERIVA (DRIFT) INSTRUMENTAL

A correção da deriva instrumental é baseada em leituras repetidas numa estação base (ao longo do tempo do levantamento). As medições são em função do tempo e admite-se que a deriva é linear entre as várias leituras. A correção da deriva num tempo t é d que é corrigida do valor observado, equação (5.11). Na Figura 12, a seguir, pode ser observada a curva de deriva de um equipamento a partir de uma estação base.

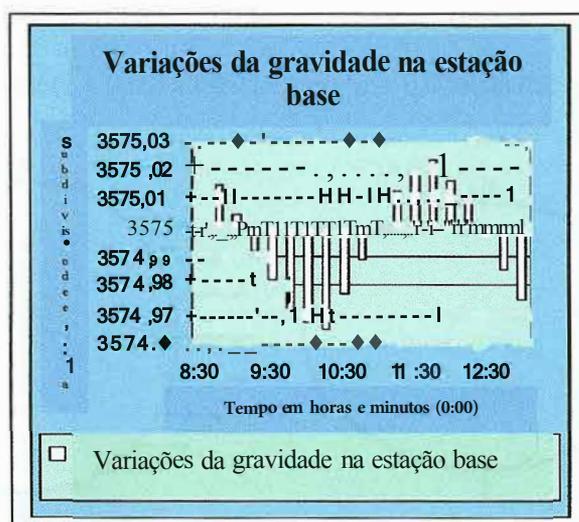


Figura 12 - Curva de deriva do gravímetro calculada a partir de leituras sucessivas numa posição fixa. Griem-Klee, S. < <http://plata.uda.cl/minas/apuntes/Geologia/EXPLORAC/TEXT/0600lgrav.html>>. Acesso em: 06.07.2007.

5.4.2 CORREÇÃO DE LATITUDE

A gravidade varia em função da latitude porque a Figura da Terra não é perfeitamente esférica. Devido a este fato, a força centrífuga a que está sujeito um corpo à sua superfície decresce desde um valor máximo no equador até zero nos polos. Observar Figura 13.

A verdadeira Figura da Terra é um esteróide oblato, cujos raios equatoriais e polares diferem de cerca de 21 km. O efeito da não esfericidade é parcialmente compensado pelo facto de haver mais massa sob a cintura equatorial que nos polos. O efeito resultante destes fatores é que o valor da gravidade nos polos excede o do equador em cerca de 5186 mGal.

A mais recente versão da equação, que relaciona a gravidade com a latitude no esteróide de referência, data de 1967, GRS 67 - 1967 Geodetic Reference System Equation, e é utilizada pelo datum IGSN 71. Observada abaixo na equação (5.12).

$$g_0 = g_{067} = 978031,846(1 + 0,005278895 \cdot \sin^2 \varphi + 0,000023462 \cdot \sin^4 \varphi) \quad (5.12)$$

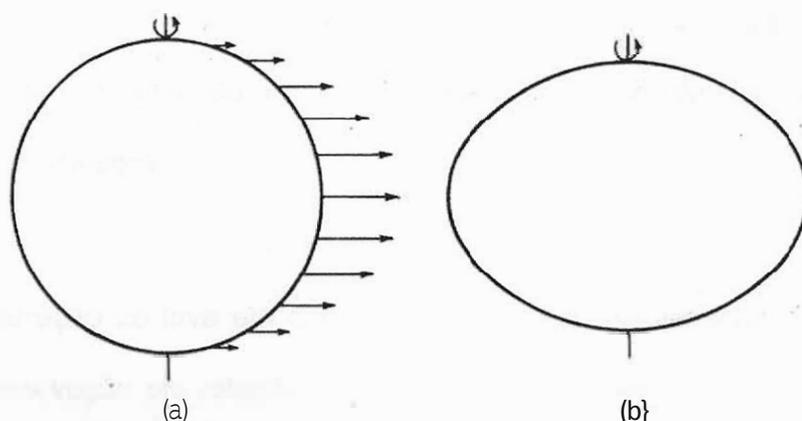


Figura 13 - (a) *Varição da velocidade angular com a latitude.* (b) *Representação exagerada da forma da Terra.*

5.4.3 CORREÇÕES DE TERRENO

As correções para compensar o fato das estações de observação poderem estar a altitudes diferentes são feitas em quatro ou três etapas: correção de ar-livre; correção Bouguer; correção de terreno e, correção de curvatura. A correção de curvatura e terreno podem ser integrada em apenas uma correção. Figura 14.

5.4.3.1 Correção de ar livre (Free-Air ou de Faye) (C_{ai})

É empregada para compensar os efeitos arbitrários da diferença de altitude das estações em relação ao geóide ou a um nível de referência arbitrário. A correção de ar livre (C_{ai}), corrige o decréscimo de g em função da altitude ou seja, admitindo que não existe qualquer massa entre o ponto de observação e o nível do mar (nível de referencia), resultante do aumento da distância ao centro da terra.

Para reduzir uma observação a um certo *datum*, efetuada a uma altitude h em relação a esse *datum* basta aplicar a seguinte relação :

$$c_{ai} = 0,3086.h \text{ (} h \text{ está em metros)} \quad (5.13)$$

A correção de ar livre é negativa para um ponto de observação situado acima do nível do mar, e positiva para um ponto localizado abaixo do nível do mar. Logo o valor da gravidade será:

$$g_{ohf} = g_o + C_{ai} \quad (5.14)$$

Esta correção só leva em consideração o efeito da variação da distância do ponto de observação em relação ao centro da Terra, não considerando contudo o efeito gravitacional das rochas presentes entre o ponto de observação e o nível de referência.

5.4.3.2 Correção Bouguer (C_b)

A correção Bouguer (C_b) consiste em adicionar, ao valor normal da gravidade, a atração de um cilindro de raio infinito e altura igual à altitude da estação no terreno (mesma altitude empregada na correção ar - livre). Resumindo, corresponde ao

acrécimo no valor de gravidade devido à massa de rocha entre o nível do mar e o ponto de observação.

$$C_b = 2JLG,d = \ddot{U},04185 ,d, \quad (5.15)$$

O valor do campo de gravidade após a correção Bouguer é:

$$g_{obsb} = g_0 + C_{at} + C_b \quad (5.16)$$

Esta fórmula considera o efeito da atração de uma camada de rocha horizontalmente infinita (*Bouguer slab*), com uma espessura h (metros) e densidade p (g/cm³) Blakely (1996). A formula acima é denominada correção Bouguer simples, pois considera um relevo plano não acidentado nas proximidades do ponto de observação.

Quando o relevo é acidentado, necessária a aplicação da correção de terreno (Ct).

5.4.3.3 Correção de curvatura (Cc)

A camada horizontalmente infinita utilizada na correção Bouguer pode ser corrigida em função da curvatura da Terra. Esta função é uma função da elevação. A correção da curvatura em mGal é:

$$C_c = (1,464 \cdot 10^{-3} h) - (3,533 \cdot 10^{-7} h^2) + (4,45 \cdot 10^{-10} h^3) \quad (5.17)$$

5.4.3.4 Correção de terreno (Ct)

A correção de Bouguer parte do princípio de que a topografia em redor do ponto de observação é plana. Isto, no entanto, raramente é verdade e por isso é

preciso proceder a um outro tipo de correção, a correção de terreno, correção esta que é sempre positiva. Na Figura 14, pode-se observar os três tipos de correção: arlivre, Bouguer e terreno.

Corrigindo as variações devido ao excesso ou falta de massa no relevo próximo ao ponto de medição, a correção de terreno é feita por meio de fórmulas e tabelas que encontram-se, por exemplo, nos livros Applied Geophysics [Telford et al., 1987] e Introduction to Geophysical Prospecting [Dobrin e Savitt, 1988].

Atualmente utiliza-se para realizar as correções de terreno o uso dos chamados modelos digitais de terreno (vulgarmente designados por intermédios de siglas como: DTM e SRTM). A partir destas representações da superfície da Terra, podemos calcular o efeito de atração pmvocado pela camada de terreno através da aplicação de um dos vários algoritmos matemáticos que existem na literatura.

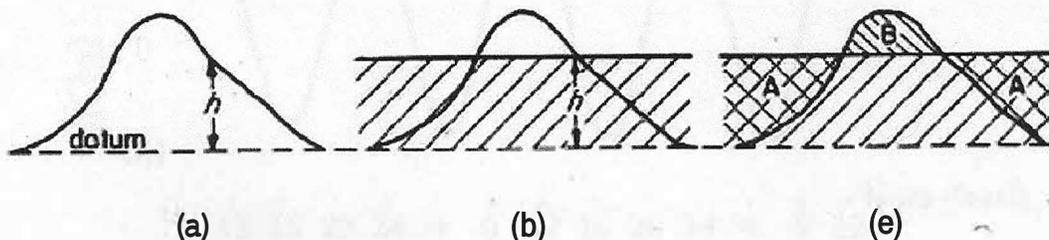


Figura 14 - (a) Correção de ar livre de uma observação situada a uma altura h acima do datum. (b) Correção de Bouguer. (e) Correção de Terreno.

A correção de terreno e correção de curvatura na maioria das vezes são combinadas em apenas uma simples correção. O valor do campo gravitacional após as correções de terreno (C_t) e a correção de curvatura é:

$$g_{ohb} = g_o + C_{al} + C_b + C_c - C, \quad (5.18)$$

5.4.4 CORREÇÃO DE MARÉ

As marés terrestres, tal como as suas congêneres marinhas, fazem com que a elevação do ponto de observação varie. Enquanto que no caso marinho a amplitude da variação pode ir desde menos de 1 m até quase à dezena de metros, no caso continental as variações atingem no máximo alguns centímetros. As variações da gravidade devidas à maré terrestre têm um máximo de amplitude de aproximadamente 0,3 mGal e um período próximo de 12h. Os efeitos de maré podem ser calculados e existem também sob a forma de tabelas publicadas na imprensa geofísica.

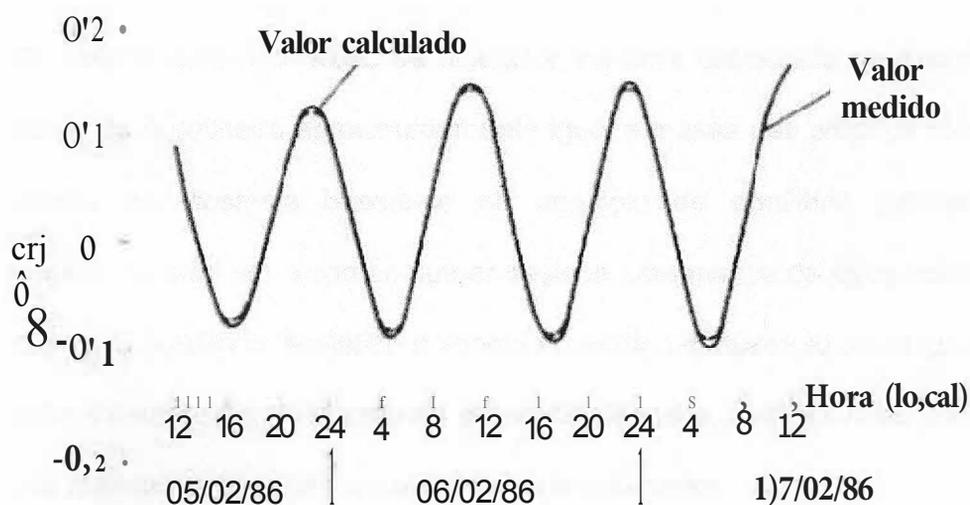


Figura 15 - Variação da gravidade devida às atrações do Sol e da Lua em Belém, Pará, Brasil (coordenadas: $1^{\circ} 30'$ sul - $48^{\circ} 30'$ oeste; altitude = 14 m). Luiz et al. (1995).

5.4.5 CORREÇÃO DE EÓTVÓS ($C_{E\dot{\sigma}t}$)

Esta correção deve ser aplicada quando o gravímetro se encontra baseado numa plataforma em movimento (barco ou avião) e depende da direção do movimento. O

efeito Eötvös aumenta a gravidade para objetos movendo-se em direção ao oeste e reduz a gravidade para objetos movendo-se para leste. Este efeito deve ser computado para todos os levantamentos em plataformas móveis (navios, aviões ou helicópteros). A correção a se fazer é:

$$C_{Eot} = ((7,503 \cdot v \cdot \cos a - \sin^2 p) + (0,004154 \cdot v^2)) \text{mGal} \quad (5.19)$$

onde, v é a velocidade em nós, a a latitude e p o azimute.

5.4.6 CORREÇÃO ISOSTÁTICA (C_{is})

De acordo com o conceito de isostasia, há uma deficiência de massa abaixo das rochas da cordilheira aproximadamente igual à massa das próprias montanhas. O conceito de isostasia baseia-se no princípio de equilíbrio hidrostático de Arquimedes, no qual um corpo ao flutuar desloca uma massa de água equivalente à sua própria. O equilíbrio isostático é atingido quando um acúmulo de carga ou perda de massa existente na parte emersa é contrabalançada, respectivamente, por uma perda de massa ou acúmulo de carga na parte submersa.

Duas hipóteses de compensação isostática, teoria de Airy e teoria de Pratt. A correção isostática assume um modelo isostático para calcular o efeito da gravidade na compensação da deficiência de massa abaixo do nível do mar.

A correção isostática é um número positivo, e seu efeito é subtraído do valor do campo gravitacional g_{067} para a contagem das raízes de baixa densidade.

$$g_{ohi} = g_0 + C_{al} + C_b + C_c - C_t - C_{is} \quad (5.20)$$

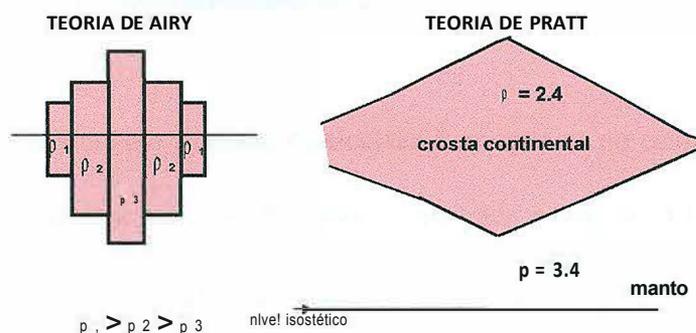


Figura 16 - Ilustração do modelo de compensação isostática teoria de Airy e teoria de Pratt. Buonora et al. (2002).

5.5 Anomalias gravimétricas

Os valores de anomalias gravimétricas são obtidos através da subtração dos corretos valores da gravidade teórica g_0 (g_{067} , g_{ch} , g_{chb} , g_{chd} , g_{chf}) dos valores da gravidade observada (já depois de corrigida da deriva do instrumento) (g_{ef}). A seguir o cálculo para os principais tipos de anomalia utilizados na interpretação de dados gravimétricos.

5.5.1 ANOMALIA DE AR LIVRE

A anomalia de Ar livre é calculada baseando-se no campo gravitacional teórico, g_{ohf} , calculado após a correções de ar livre e mostrada na equação (5.14). Logo a anomalia de Ar Livre pode ser assim calculada:

$$ANa = g_{,j} - g_{Ohf} \quad (5.21)$$

5.5.2 ANOMALIA BOUGUER SIMPLES

A anomalia Bouguer Simples é calculada baseando-se no campo gravitacional teórico, g_{obs} calculado após a correção Bouguer e mostrada na equação (5.16). Logo a anomalia Bouguer Simples pode ser assim calculada:

$$ANsb = g_{ej} - g_{obs} \quad (5.22)$$

5.5.3 ANOMALIA BOUGUER COMPLETA

Subtraindo-se do valor da gravidade observada no terreno (g_A), já corrigido dos efeitos de maré, variação instrumental e latitude, o valor da gravidade normal reduzido para o nível do terreno (g_{ohb}), mostrada na equação (5.18), obtém-se a anomalia Bouguer Completa:

$$ANcb = g_{,f} - g_{ohb} \quad (5.22)$$

5.5.4 ANOMALIA ISOSTÁTICA

E por fim a anomalia Isostática que é calculada considerando o valor do campo gravitacional, calculado a partir da correção isostática (g_{or}), mostrada na equação (5.20).

$$ANis = g_{,f} - g_{or} \quad (5.23)$$

5.6 Interpretação de anomalias gravimétricas

O objetivo da interpretação de dados gravimétricos é mostrar um novo modelo da geologia de subsuperfície, contribuindo assim para a simplificação ou resolução dos problemas de exploração geológica.

A interpretação pode ser realizada de modo direto, através da construção de um modelo inicial que melhor se aproxima das informações geológicas e geofísicas disponíveis; através do modo inverso onde um modelo inicial é assumido, porém os seus parâmetros são calculados automaticamente; e através do realce dos dados e imageamento, onde nenhum dos parâmetros do modelo é calculado, mas a anomalia passa por um processamento especial de modo a enfatizar algumas características da fonte, tais como, profundidades relativas, alinhamentos, distribuição e resolução espaciais.

Nos tópicos a seguir, os principais fatores controladores da interpretação.

5.6.1 CONTROLES DA INTERPRETAÇÃO

5.6.1.1 Ambiguidade na interpretação

A ambiguidade na interpretação é gerada de duas formas: (1) a primeira quando recebemos dados do levantamento de campo e tentamos extrair informações e criar um modelo que mais se encaixe no modelo geológico

idealizado, atentando para distribuição de massas e para a anomalia gravimétrica residual (retirado o efeito gravimétrico regional do dado); a segunda forma, (2) quando a partir de um modelo gravimétrico global tenta-se extrair as anomalias gravimétricas localizadas na área de interesse geológico.

Como não existe uma única solução na interpretação gravimétrica, a intuição e o conhecimento geológico do interprete, são de grande importância para que o mesmo chegue em sua interpretação o mais próximo da geologia real de subsuperfície.

5.6. 1.2 Anomalia gravimétrica e efeito da gravidade

As anomalias residuais de Ar Livre, Bouguer e Isostática representam as diferenças entre o campo gravimétrico teórico e o medido. O termo, anomalia gravimétrica, também pode ser utilizado para mostrar características gravimétricas pontuais, diferentes das características gravimétricas locais ou regionais em uma determinada área, podendo ser mostradas em mapas e perfis.

Segundo West (1992), os termos anomalia gravimétrica e efeito da gravidade são usados de forma trocada em grande parte dos livros. É importante restringir o termo efeito de gravidade aos valores de gravidade que podem ser calculados e o termo anomalia gravimétrica para valores que são derivados de medidas realizadas no campo ou ainda valores calculados a partir de medidas efetuadas no campo (anomalias residuais, como Bouguer, Ar Livre e Isostática).

5.6.1.3 Contraste de densidade

A densidade utilizada para calcular o efeito da gravidade no modelo idealizado, não é a densidade do corpo anômalo, mas sim o contraste entre a densidade do corpo anômalo e as rochas encaixantes. O contraste de densidade é dado pela seguinte equação:

$$\Delta\rho = \rho_{CA} - \rho_{enc} \quad (5.24)$$

onde, ρ_{CA} é a densidade do corpo anômalo e, ρ_{enc} é a densidade da rocha encaixante.

O contraste de densidade para um modelo, é estimado considerando a densidade provável das rochas que provocam a anomalia gravimétrica. Esta informação pode vir de medidas de densidade em amostras de rocha, gravimetria de poço, gamma-gamma logs de densidade, comparações entre velocidade sísmica e densidade ou de tabelas de densidade de rocha.

5.6.1.4 Estrutura x Contraste de densidade do embasamento

Considerando duas situações diferentes: (1) a primeira situação, temos uma seção geológica com cerca de 100 km, com duas rochas com diferentes densidades formando o embasamento de uma determinada área, tendo como contato exatamente o km 50, estas rochas estão localizadas em uma mesma profundidade e a rocha menos densa esta localizada a oeste da rocha mais densa; em uma segunda situação (2) considerando uma seção geológica com também 100 km,

temos apenas uma rocha conformando o embasamento, apenas uma densidade, contudo a mesma esta falhada no km 50 desta seção provocando o rebaixamento do bloco localizado a oeste. Observar Figura 17.

Nas situações descritas acima, a seção gravimétrica gerada a partir da duas situações é extremamente parecida e, somente observando a seção gravimétrica, fica muito difícil interpretar o correto modelo para uma determinada área. Este problema descrito acima é bastante comum tanto na exploração de hidrocarbonetos como na exploração mineral.

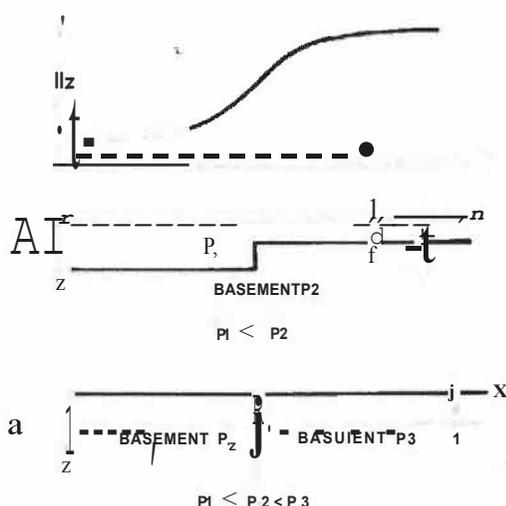


Figura 17 - Efeito da gravidade em um seção geológica falhada e em uma seção geológica com embasamento com diferentes densidades. West, 1992.

5.6.1.5 Estimativa de profundidade

A forma mais comum para se fazer a estimativa de profundidade de um corpo, é comparar a anomalia gravimétrica com o efeito de gravidade em um modelo idealizado. Na Figura 18, poderemos observar os diferentes efeitos de gravidade causados por corpos de geometria simples e densidade constante.

Quando se busca um modelo para anomalia gravimétrica sempre se inicia com as formas geométricas simples que poderão representar o corpo anômalo, como esferas e cilindros. Observar as Figuras 19 e 20.

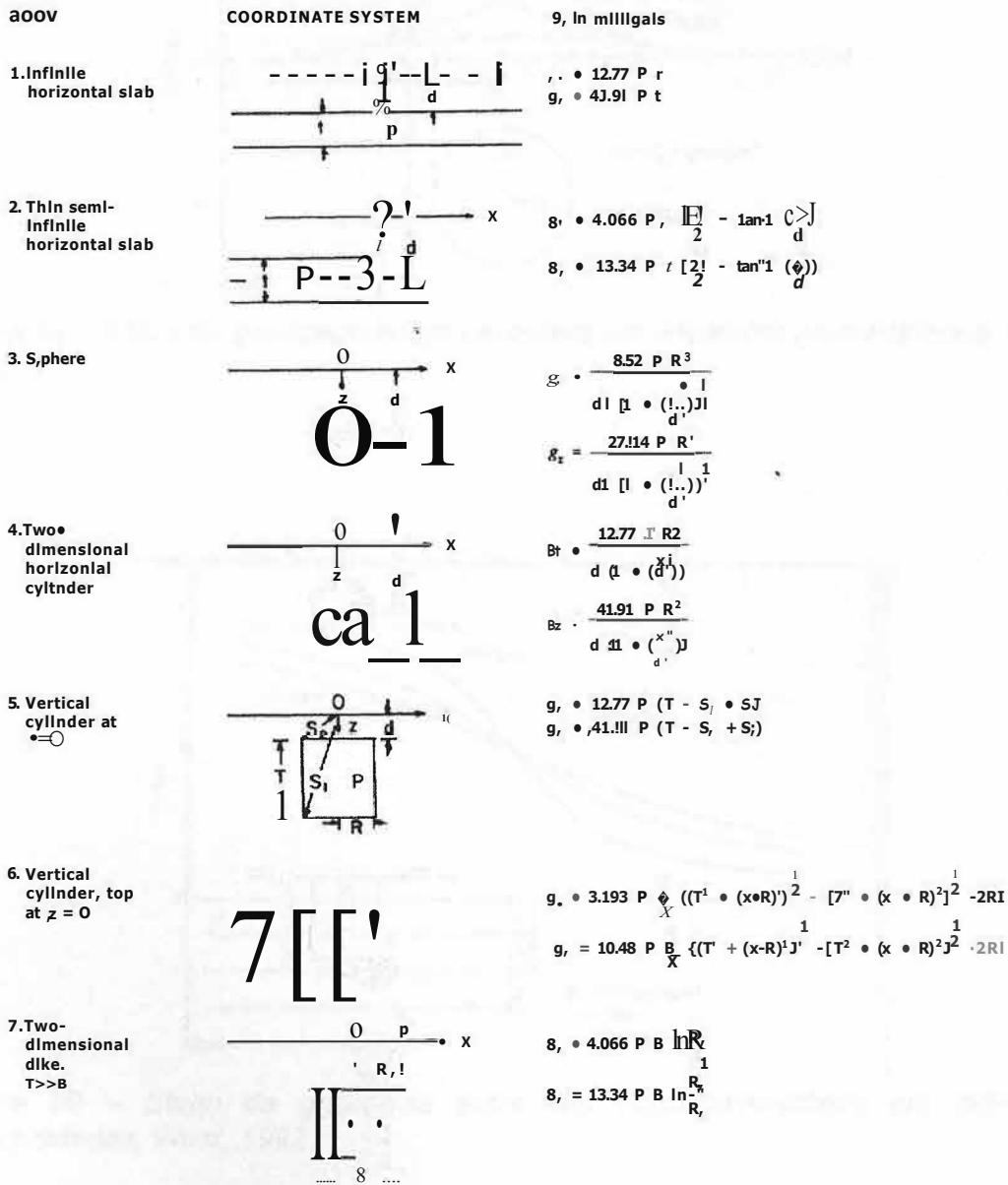


Figura 18 - Efeito de gravidade g , causado por corpos de geometria simples e densidade constante. West, 1992.

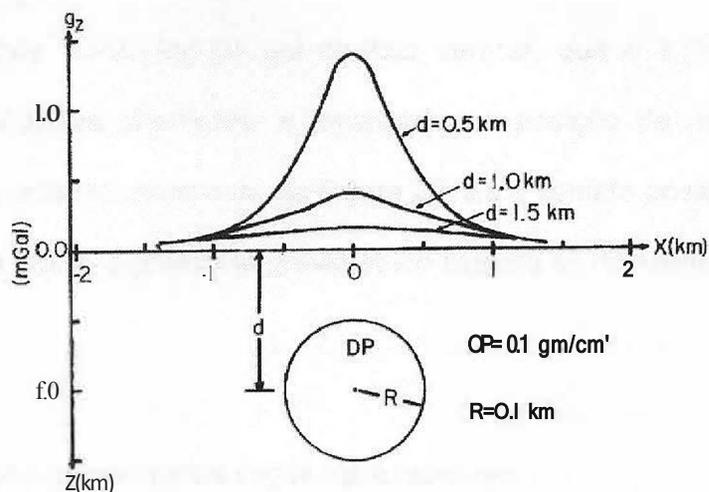


Figura 19 - Efeito da gravidade sobre um esfera em diferentes profundidades. West, 1992.

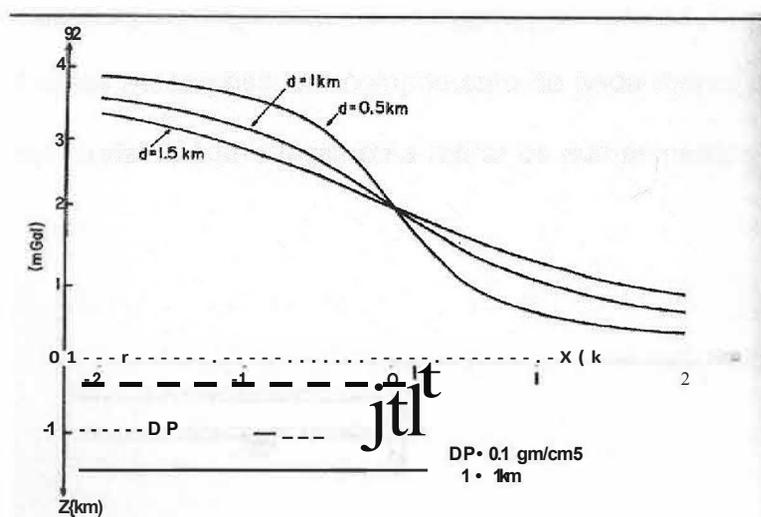


Figura 20 - Efeito da gravidade sobre um bloco semi-infinito em diferentes profundidades. West, 1992.

5.6.1.6 Localização de um contato vertical

A localização horizontal de um contato vertical, que é a borda entre duas rochas de densidades diferentes, é localizado na posição de máximo gradiente horizontal. Isto pode ser observado na Figura 20. Se o contato possuir um mergulho, a localização do máximo gradiente gravimétrico sempre se direciona para o contato.

5.6.1.7 Separação de anomalias regionais e residuais

A anomalia gravimétrica de interesse, a anomalia residual, pode ser separada da anomalia "regional" de modo que seja analisada. Uma das metodologias adotada é a separação baseada em comprimento de onda das anomalias gravimétricas. Fontes rasas possuem comprimento de onda menor que fontes mais profundas. Filtros digitais podem facilmente retirar os comprimentos de ondas curto ou longos.

6 ESTUDO DE CASO

6.1 Introdução

O presente estudo de caso, *"A geological and geophysical crustal section across the Magallanes-Fagnano fault in Tierra del Fuego"*: dos autores A. Tassone; H. Lippai; E. Lodolo; M. Menichetti; A. Comba; J.L. Hormaechea; J.F. Vilas de diversos institutos de geologia e geofísica da Argentina e Itália, teve como principal objetivo, a integração de dados geológicos, magnetométricos e gravimétricos para delinear na porção Argentina da Ilha da Terra do Fogo mais precisamente no sistema de falha Magallanes-Fagnano (MFS), as principais características estruturais e o cenário tectônico da área.

A área estudada (Figura 21) está localizada ao sul da bacia Austral.

Como a presente monografia tem o objetivo de mostrar o conhecimento adquirido no método geofísico descrito. A ênfase do texto que virá a seguir será dada ao levantamento gravimétrico, e ao modelamento numérico realizado para os dados de gravidade.

O modelo numérico bidimensional (2D) foi executado usando os dados da anomalia de Bouguer e, foi realizado utilizando o software IGMAS (Gotze, 1978,; Gotze e Lahmeyer, 1988,; Schmidt e Gotze, 1998) baseado no algoritmo de Won & Bevis (1987).

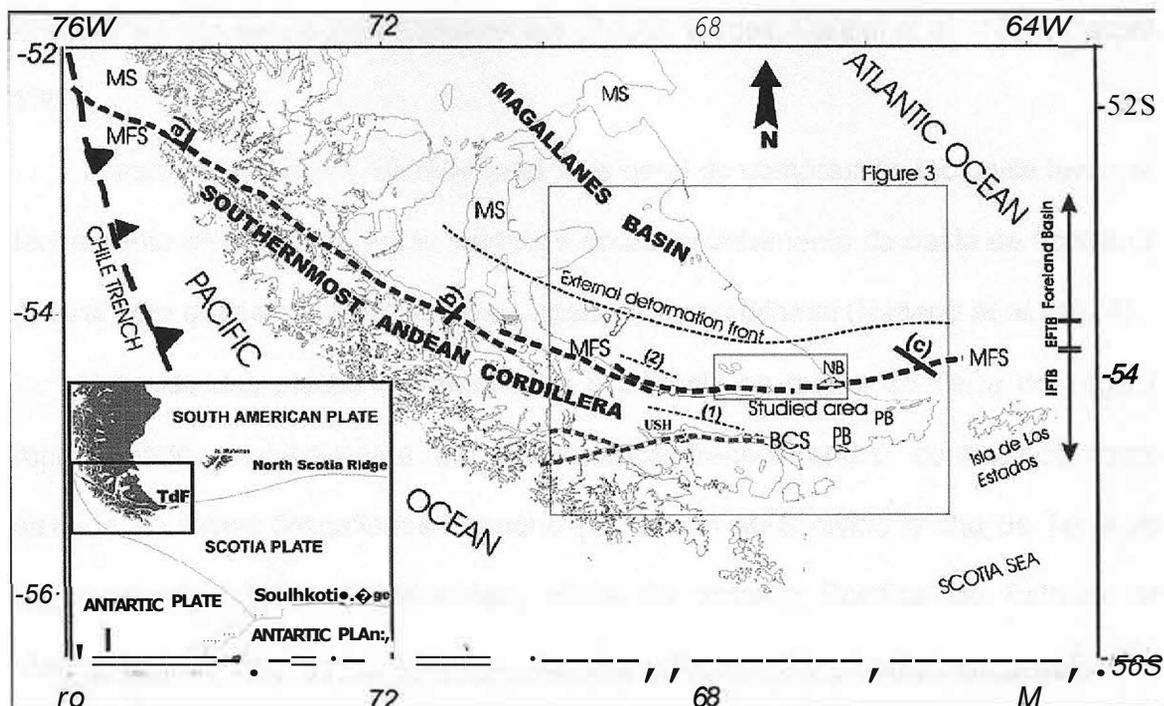


Figura 21 - Localização da área do estudo de caso. No diagrama (i), mapa tectônico; em (ii) mapa geológico simplificado da Ilha da Terra do Fogo e localização dos termos utilizados no texto: EFTB, cinturão de dobramento e empurrão externo; IFTB, cinturão de dobramento e empurrão interno; NB, bacia neogenica; PB, bacia pa/eogenica; (1), zona de falha Vale Carabaja; (2), zona de falha Lago Deseado; MS, Estreito de Magalhães; MFS, sistema de falhas Magal/anes-Fagnano; BCS, Sistema de falhas canal de Beagle; e USH, Ushuaia. A caixa "studied area" representa a área do estudo de caso.

6.2 Geologia

A presente configuração tectônica da Ilha da Terra do Fogo (Figura 21) é resultado de uma longa e complexa evolução da porção mais ao sul da América do Sul. Após a metade do jurássico, a parte sul do continente sul-americano sofreu extensão associada com o colapso do Gondwana, Figura 9, esta extensão é representada: pelo vulcanismo felsico da grande província ígnea da Patagônia e Península Antártica (Pankhurst *et al.*, 2000); pela produção de crosta oceânica na bacia de backarc (como os complexos ofiolíticos de Tortuga e Sarmiento); e das

deposições das sequências transicionais (Rocas Verdes; Dalziel *et al.*, 1974; Dalziel, 1981).

A aproximadamente 100 Ma, uma fase geral de compressão tectônica levou ao fechamento da bacia de Rocas Verdes e ao desenvolvimento da bacia de "foreland" Austral com depósitos de sedimentos elásticos da cordilheira (Natland *et al.*, 1974).

A borda das placas Sul-americana e Escócia na região da Terra do Fogo é representado principalmente por lineamentos transcorrentes, conhecidos como sistema de falhas Magallanes-Fagnano (MFS). O MFS divide a Ilha da Terra do Fogo em dois blocos continentais, inicia da entrada Pacífica do Estreito de Magalhães até a costa Atlântica da Ilha (Figura 21), onde um significativa deformação relacionada aos falhamentos transcorrentes vêm sendo estudado tanto em áreas continentais como em áreas "offshore" (Winslow, 1982; Cunningham, 1993; Klepeis & Austin, 1997; Cerredo *et al.*, 2000; Diraison *et al.*, 2000; Lodolo *et al.*, 2002a,b).

O sistema principal consiste em um sistema com vergência para norte, de direção ESE-WNW, com dobras assimétricas e empurrões, devido principalmente ao recente encurtamento N-S durante o Cretáceo-Paleogeno.

A área lântada expõe seqüências marinhas da bacia marginal Rocas Verdes (Formação Yahgan) e, localmente, embasamento vulcanoclástico, constituindo uma cunha imbricada que afina para norte. Os sedimentos que sobrepõe estas sucessões sin-tectônicas, Figura 22 e 23, consistem da seqüência silioiclástica da bacia "foreland" Austral.

A sudeste do Lago Fagnano, os argilitos da Formação Yahgan foram intrudidos pelo monzodiorito Cerro Hewhoepen que ocupa aproximadamente 4 km², e coincide com um relevo alto e isolado com aproximadamente 800 m. Esta intrusão é

afetada pelas estruturas transtensionais da bacia "pull-apart" Lago Fagnano e contrações tectônicas (Figura 22 e 23).

Um sistema do Oligoceno-Quaternário, E-W, com falhamentos transcorrentes sinistrais com componentes extensionais sobrepondo estruturas contracionais, é responsável pela principal depressão do Lago Fagnano (Lodolo et al., 2003). Os sedimentos glaciolacustres do Pleistoceno, na costa leste do Lago Fagnano, estão deformados por diversos grupos de falhas normais E-W, subverticais com mergulhos para sul, prevalecendo o componente transtensional sinistral. Neste setor, as drenagens estão claramente influenciadas pela presença destas estruturas E-W relacionadas aos falhamentos transcorrentes, com captura de diversas cabeceiras, como na parte alta dos vales onde estão os rios Turbio e Lainez (Menichetti et al., 2001; Lodolo et al., 2002a).

6.3 Geofísica

Os autores do artigo analisado tiveram como objetivo, prover evidência geofísica sobre a geometria e orientação das unidades geológicas em subsuperfície, como também a natureza do tectonismo transformante do MFS, do Lago Fagnano oriental para o Atlântico.

Dentro da área estudada, segundo os autores, os dados gravimétricos e magnetométricos geraram informações críticas, pois a zona central é dominada por florestas que dificultam o acesso, e os afloramentos são restritos ao Lago Fagnano e à costa Atlântica. A análise conjunta dos dados geológicos e geofísicos permitiu

aos autores, apresentar várias seções N-S que exibem as principais características geológicas associadas com MFS.

Os dados foram adquiridos em quatro etapas de campo durante o período de 1998 até 2002. Os trabalhos foram realizados em áreas remotas da porção centro-oriental da Ilha da Terra do Fogo.

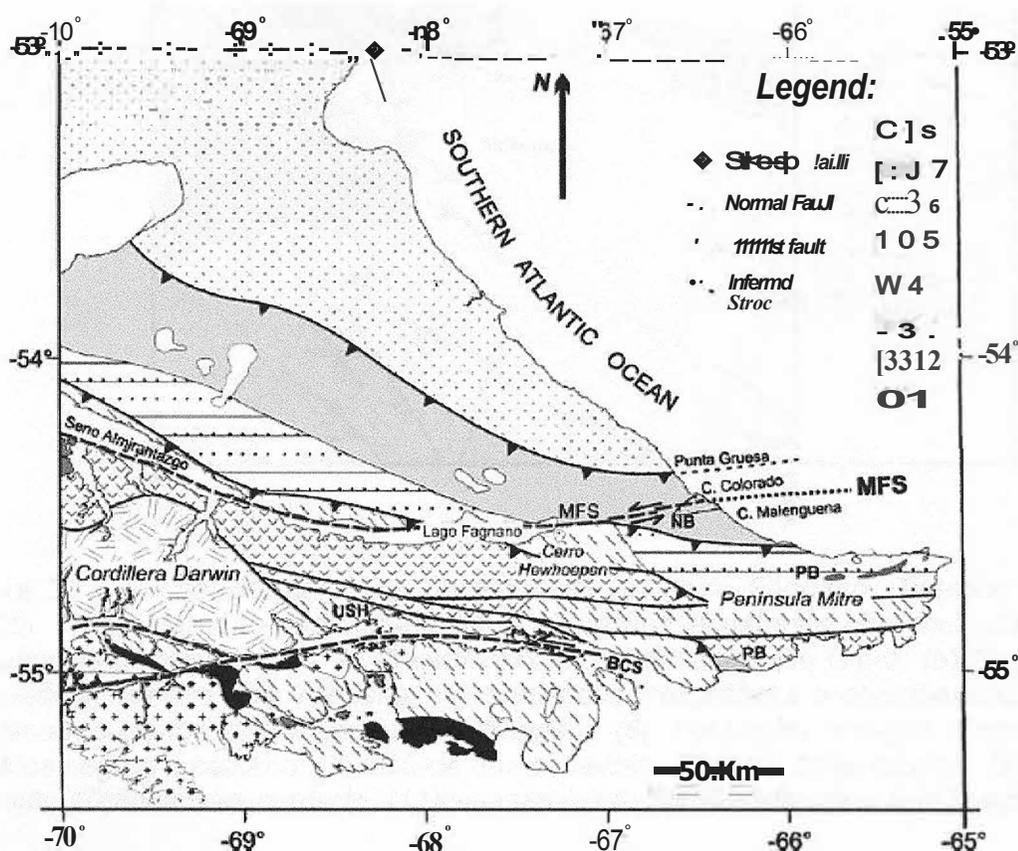


Figura 22 - Mapa geológico simplificado da porção leste da Ilha da Terra do Fogo, Tassone et al. (2005). As maiores estruturas foram interpretadas de imagens SPOT, fotografias aéreas e mapeamento de campo. NB, bacia neogenica; PB, bacia paleogenica MFS, sistema de falhas Magallanes-Fagnan; BCS, sistema de falhas canal de Beagle; and USH, Ushuaia. Legend: (1) embasamento; (2) Formação Lemaire (Argentina)/ Formação Tobifera (Chile); (3) Complexo Tortuga; (4) Formações Yahgan e Beauvoir; (5) Depósitos Neocretáceos; (6) Batólito Patagônico; (7) depósitos Terciários deformados; e (8) depósitos Terciários não deformados.

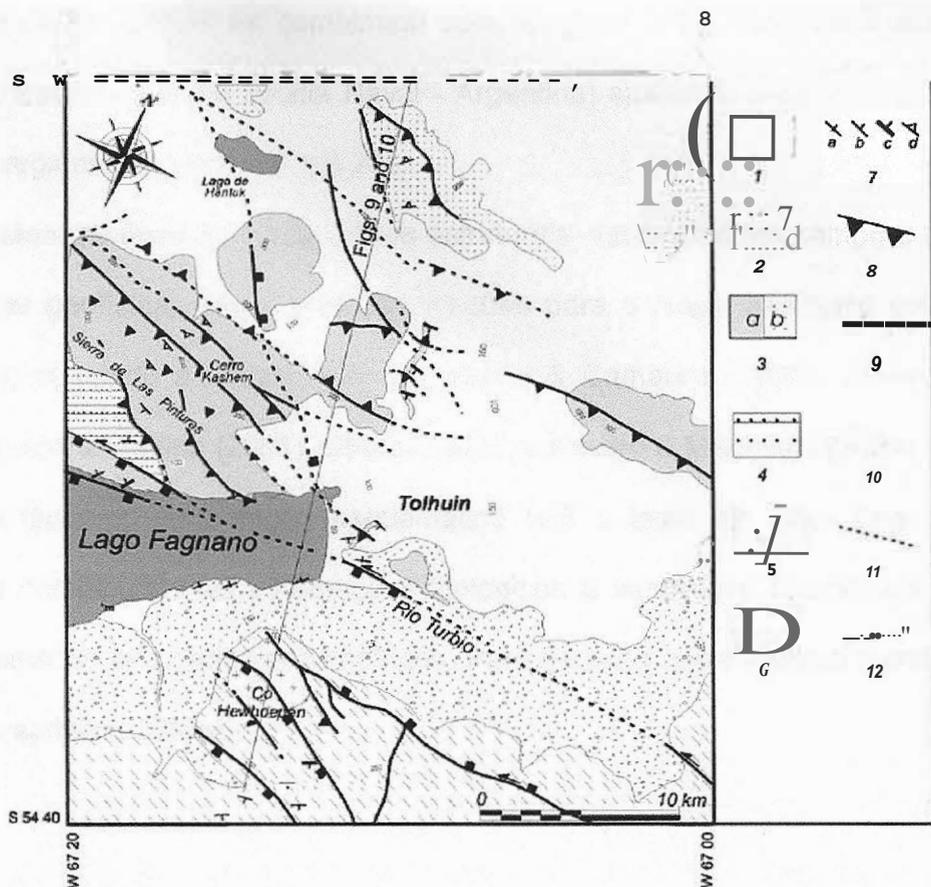


Figura 23 - Mapa geológico da porção leste do Lago Fagnano. Tassone et al. (2005). (1) Quaternário não diferenciado - depósitos lacustres e glaciolacustres; (2) sequências glaciolacustres do Pleistoceno; (3a) Formação Rio Claro; (b) Grupo La Despedida; Arenito fino Terciário; (4) grauvasas feldspáticas e conglomerados do Cretáceo superior; (5) Intrusão Hewhoepen; (6) Formação Yahgan Formation, argilitos negros e calcário; (7) atitude das camadas; (8) falha de empurrão; (9) falha normal; (10) falha transcorrente; (11) lineamentos tectônicos inferidos; e (12) estrada.

Todos os pontos mapeados de geologia, gravimetria, magnetometria e suscetibilidade magnética, tiveram suas coordenadas tomadas com DGPS (sistema de posicionamento global diferencial). Devido à falta de informação topográfica precisa, que poderia prover cobertura completa da área estudada, imagens de SAR (adquirido de ERS-1 e ERS-2) foram utilizadas para produzir um modelo digital do terreno (DEM) para executar as correções topográficas necessárias ao levantamento gravimétrico.

Além disso, o DEM foi combinado com imagens SPOT e fotografias aéreas (1:30,000, Servicio de Hidrografia Naval - Argentina) ajudando a determinação das lineações regionais (Figuras 21 até 23).

As amostras de rochas e os dados estruturais, mapeados em campo e com os métodos de geofísica, forneceram informações para o mapa geológico preliminar (Figura 23) seguindo a estratigrafia de Buatois & Camacho (1993), Olivero *et al.* (1999), Olivero & Medina (2001), Olivero (2002) e Olivero & Martinioni (2001).

Para finalizar, uma seção esquemática N-S a leste do Lago Fagnano foi preparada combinando as informações litológicas e estruturais disponíveis com o modelo numérico dos dados gravimétricos. Para geração deste modelo numérico foi utilizado o software IGMAS.

6.3.1 MEDIDAS GEOFÍSICAS

6.3.1.1 Gravimetria

Os dados gravimétricos foram adquiridos com um gravímetro LaCoste-Romberg, do tipo relativo, onde uma massa suportada por uma barra horizontal é presa a uma mola e, quando ocorre a variações na gravidade, esta afeta a massa alterando o comprimento da mola.

Como já dito anteriormente os dados para realização das correções de terreno foram retirados do modelo digital do terreno (DEM), que por sua vez foi restituído das imagens SAR.

A correção de deriva instrumental foi realizada com a reocupação diária de estações-base pré-estabelecidas. Pequenas mudanças nas leituras foram atribuídas à variação de deriva instrumental, contudo esta correção de *drift* instrumental foi aplicada aos dados gravimétricos através de interpolação linear. A correção de maré (relacionado à atração do sol e lua) também foi aplicada para toda medida de gravidade.

A base de gravidade absoluta utilizada foi Ushuaia, que esta ligada ao sistema IGSN71 (Morelli et ai., 1974; Gantar, 1993).

6.3.1.2 Magnetometria e suscetibilidade magnética

O equipamento utilizado para o levantamento magnetométrico foi um EG&G Geometrics e um próton magnetômetro da Scintrex. Todos os dados foram corrigidos para variações diurnas, com os dados de base obtidos no boletim da ilha de Falkland para os anos de 1998 até 2001 (período de aquisição de dados). O campo de referência geomagnético internacional (IGRF) foi removido dos dados adquiridos, de forma que as anomalias magnéticas residuais são somente devido à geologia.

Foram executadas medidas de suscetibilidade magnética para cada afloramento representativo, com um suscetibilímetro Bartington MS2. São exibidos os resultados para cada unidade geológica medida na Tabela 2 a seguir. Observar o contraste entre as unidades sedimentares e o corpo intrusivo.

Tabela 2 - Valores medidos de suscetibilidade magnética para cada unidade geológica. Tassone *et al.*, (2005).

Unidade geológica	Idade	Suscetibilidade Gm^3/ka
Fm. Le Maire	Neojurássico	15×10
Fm. Yaghan / Beauvoir	Cretáceo inferior	159×10^{11}
Fm. Matretro/Kami	Cretáceo superior	86×10^{11}
Intrusão Hewhoepen	Cretáceo superior	13568×10
Fm. Rio Claro	Paleoceno	540×10^{-8}
Fm. Punta Torcida	Eoceno	119×10^{-8}
Fm. Cabo Colorado	Eoceno	93×10^{-8}
Fm. Letícia	Eoceno	85×10
Fm. Cabo Pena	Mioceno	267×10

6.3.2 RESULTADOS E INTERPRETAÇÃO GEOFÍSICA

6.3.2.1 Perfis geofísicos e mapas

Neste trabalho foram apresentados, dois mapas geofísicos e três perfis geofísicos.

Do levantamento gravimétrico foi feito o mapa de anomalia Bouguer completa (Figura 24-C) mostrando uma tendência à diminuição dos valores Bouguer regionais em direção sul, o que sugere o aumento de profundidade do embasamento para esta porção da área. Em terreno continental, o campo gravimétrico é caracterizado por anomalias que variam de -10 a -50 mGal. Algumas anomalias podem ser individualizadas como: (CH) - anomalia positiva que é relacionada à intrusão monzodiorítica Cerro Hewhoepen; entre Lago Fagnano e a costa Atlântica, aparecem claramente duas anomalias negativas, uma localizada ao sul de Cabo Colorado (Mi CC) e o outro na porção oriental do vale do Turbio Rio (Mi LC). Outro

mínimo (Mi CLF) corresponde a depressão correlacionada ao estuário do Rio Turbio. Estes três mínimos estão organizados aproximadamente na direção E-W. Os autores colocam que a tendência anômala regional, E-W, pode ser observada no mapa de anomalia de ar-livre na porção central da Ilha da Terra do Fogo, este mapa foi publicado pelo próprio em 1999 (Tassone *et al.*, 1999) e esta anomalia foi correlata com a anomalia de ar-livre obtida de imagens de satélite no Atlântico offshore (Sandwell, 1995).

O mapa magnético do campo total, apresentado na Figura 24-D, mostra valores de anomalia variando entre -500 e 2500 nT. O mapa exhibe uma anomalia máxima principal a sudeste de Lago Fagnano, correspondente a intrusão monzodiorítica Cerro Hewhoepen, com tendência WNW-ESE e gradientes mais fortes na direção de ENE-WSW.

Na Figura 25, é possível observar as correlações entre os dados gravimétricos, magnéticos e topográficos combinados em seções topográficas N-S e NW-SE. Em todas as seções gravimétricas fica possível a observação de mínimos gravimétricos, correlacionados ao MFS no vale do Rio Irigoyen, com gradiente de 5 mGal para o perfil P-CLF (Lago Fagnano) com largura de aproximadamente 7 km, 4 mGal para o perfil P-LC (La Correntina) com largura de aproximadamente 10 km e 8 km no perfil P-CC (Cabo Colorado). Todos estes valores mínimos são interpretados como corpos de baixa densidade (bacias possivelmente rasas). Observar posição na Figura 24-A.

A tendência regional, para diminuição dos valores de anomalia Bouguer para sul, é identificada nos três perfis: entre estações 272 e 231 no perfil P-CLF/Lago Fagnano, estações 195 e 28 no perfil P-LC/La Correntina, e estações 173 e 322 no perfil P-CC/Sul Cabo Colorado. As anomalias positivas tanto gravimétricas quanto

magnéticas representam no perfil P-CLF/Lago Fagnano a intrusão Cerro Hewhoepen.

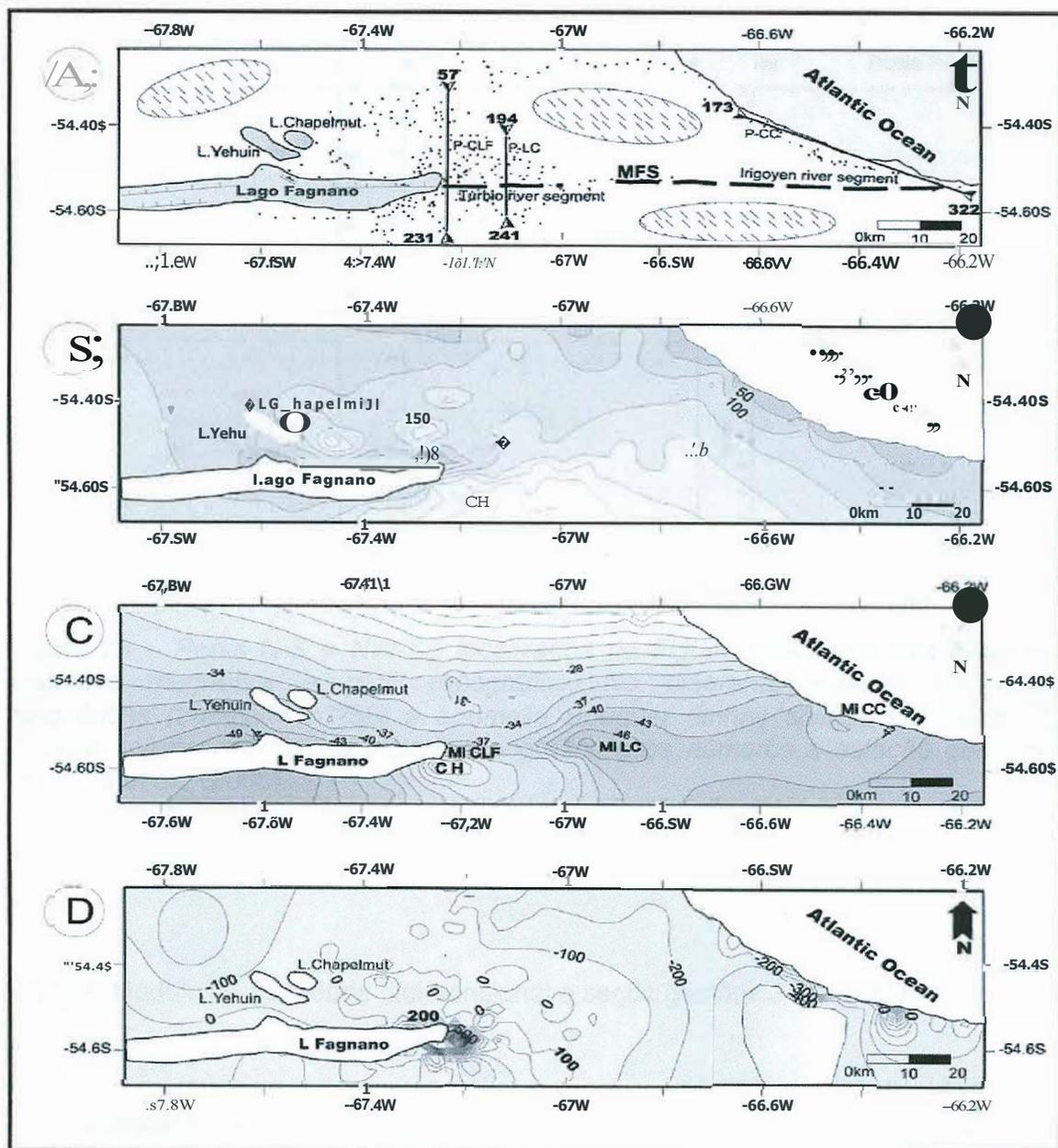


Figura 24 - (A) - Mapa da área estudada, mostrando a distribuição dos pontos geofísicos (pontos negros) e localização das seções. O traço P-CLF corresponde a localização do modelo gravimétrico e a seção geológica interpretada. O segmento tracejado representa o sistema de falhas Magallane-Fagnano (MFS) e, as áreas hachura elipsóides são áreas não levantadas; (B) - Mapa topográfico linhas de contorno a cada 50m (das medidas de elevação adquiridas nas estações DGPS); (C) - Mapa de anomalia bouguer completa, Unhas de contorno a cada 3 mGal. Legenda : Mi - Anomalia Bouguer mínima; CLF - porção leste do Lago Fagnano que corresponde a depressão do estuário do Rio Turbio; LC - setor leste que corresponde a terminação leste do vale ocupado pelo Rio Turbio; CC - Cabo Colorado; CH - máxima anomalia bouguer na intrusão Cerro Hewhoepen; (D) -

Mapa magnético campo total, linhas de contorno a cada 100 nT. Modificado de Tassone et al., (2005).

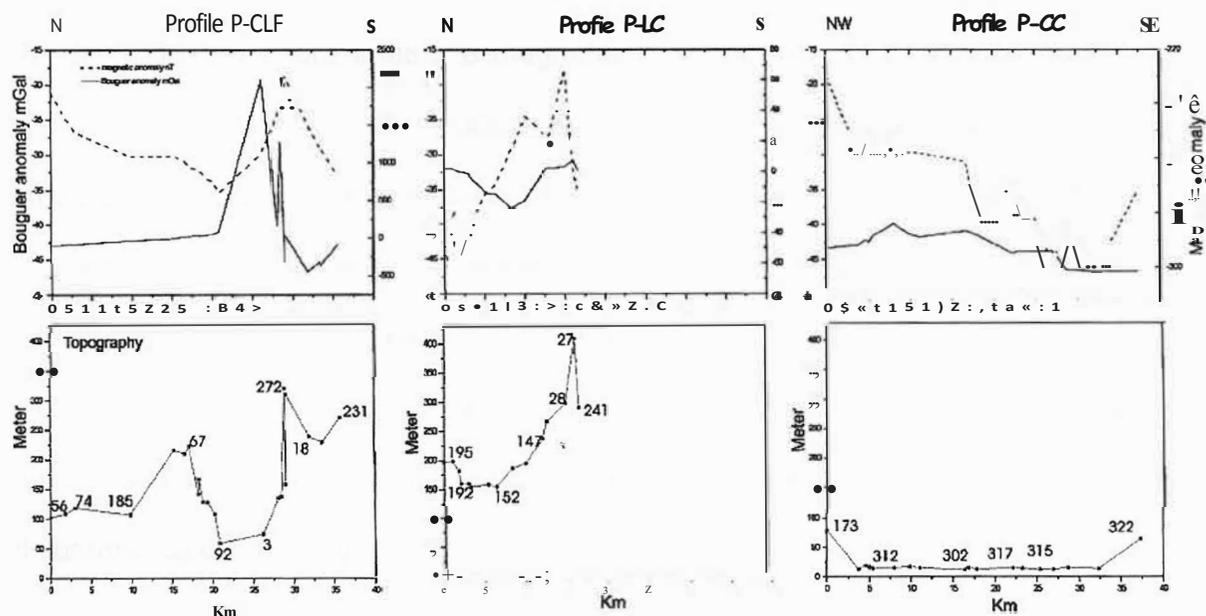


Figura 25 - Perfis N-S e NW-SE localizados na Figura 24-A, anomalia Bouguer, anomalia magnética e perfil topográfico. No diagrama superior Anomalias magnéticas (tracejado nT/50) e anomalia Bouguer (linhas sólidas em mGal). O diagrama inferior representa o perfil topográfico e os números a estação geofísica. Tassone et al., (2005).

6.3.2.2 Modelo de gravidade bidimensional e seção geológica interpretada

O modelo numérico bidimensional (20) (Figura 26) foi executado utilizando os dados da anomalia de Bouguer. O modelo é exibido em uma seção N-S de aproximadamente 40 km por 10 km de profundidade.

O modelo foi realizado utilizando o software IGMAS (Gotze, 1978; Gotze e Lahmeyer, 1988; Schmidt e Gotze, 1998) baseado no algoritmo de Won & Bevis (1987). A densidade de cada unidade geológica foi medida em amostras secas com

um picnômetro, mostrando boa correlação com os valores informados na literatura (Dobrin, 1975). A densidade de referência foi 2.67 g/cm^3 .

O software IGMAS é um sistema gráfico computacional interativo, que modela campos potenciais (gravimetria e magnetometria) através de simulação numérica (Götze, 1978; Götze, 1984; Götze & Lahmeyer, 1988). O procedimento de modelamento é baseado no método de "tentativa e erro". O algoritmo utilizado para o cálculo do campo potencial é baseado em poliedros triangulares (Götze, 1978), e teve sua revisão e extensão em 1995 (Tassone *et al.*, 2005).

Na seção modelada, o MFS (sistema de falhas Magallanes-Fagnano) é relacionado a um valor mínimo de anomalia Bouguer (-39 mGal), observar diagrama superior da Figura 26.

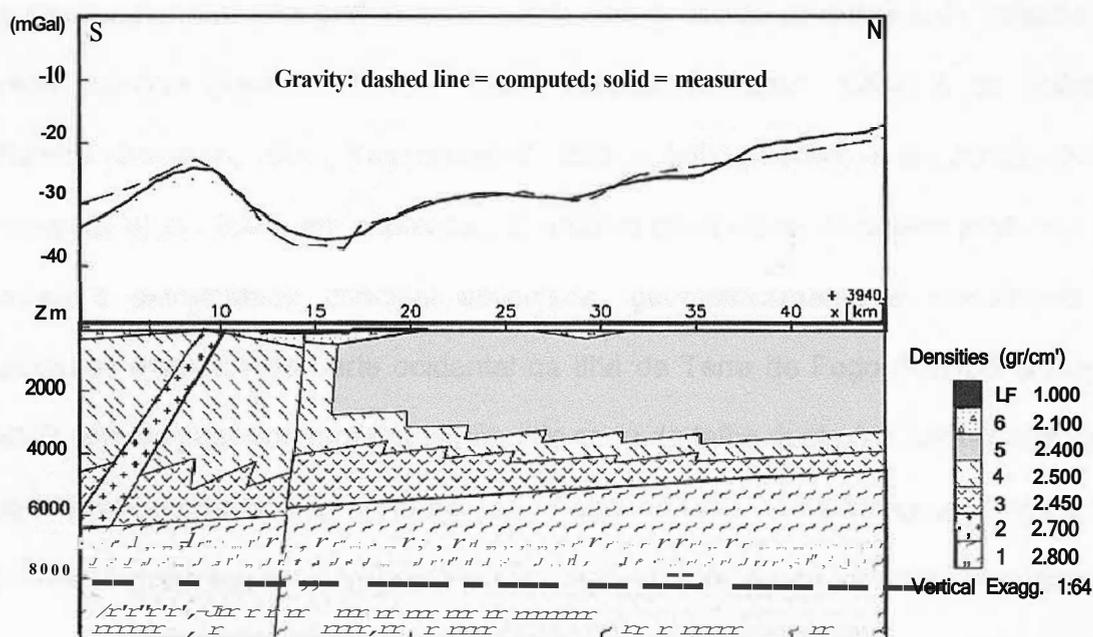


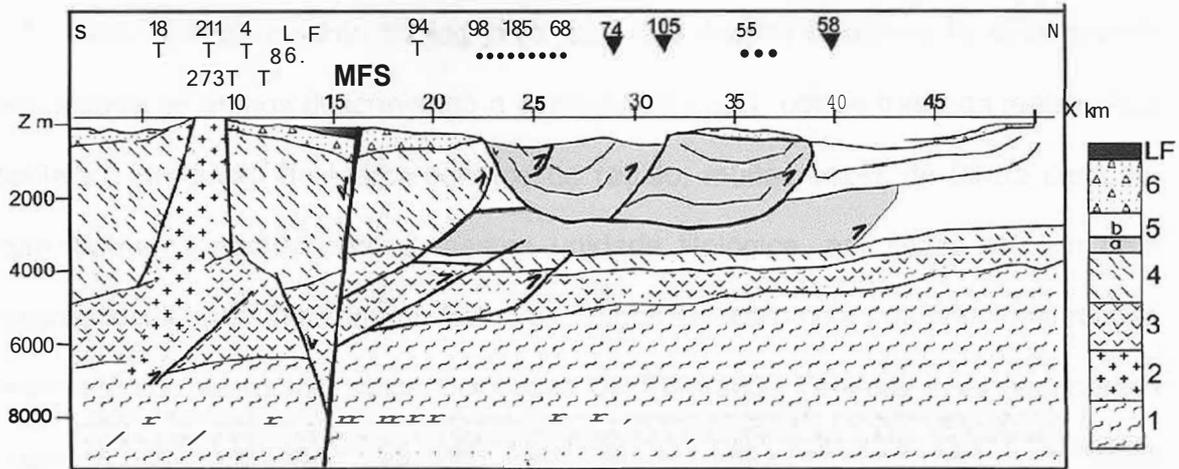
Figura 26 - Modelo numérico 20 criado com o dado proveniente da anomalia Bouguer completa. O modelo foi realizado com o software IGMAS. (1) embasamento Paleozóico; (2) intrusão monzodiorítica (Cretáceo superior-meio do Mioceno); (3) Formação Lemaire (Neojurássico); (4) Formação Yahgan (Neocretáceo, argilito negro e calcário); (5) rochas sedimentares sin-orogênicas Terciárias; e (6) depósitos não diferenciados do Mioceno - Quaternário. Tasson *et al.* (2005).

A bacia assimétrica do Lago Fagnano é interpretada como associado ao MFS. O modelo numérico quantitativamente obriga a disposição das unidades Cretáceas e Jurássicas afetadas pela compressão andina, como também a extensão lateral das unidades sin-orogênicas do Terciário. Um bom ajuste foi realizado entre os valores medidos e os calculados para a profundidade do embasamento Paleozóico, cuja geometria modelada indicou um afundamento para o sul de 5 para 7 km.

O corpo intrusivo Hewhoepen aparece na parte sul da seção modelada, coincidente com um máximo gravimétrico de -21 mGal (Figuras 24-C, 25, e diagrama superior, Figura 26) e um máximo magnético de 2110 nT (Figura 25).

A seção geológica modelada, N-S, apresentada na Figura 27, foi gerada a partir da combinação dos dados gravimétricos, informações geológicas de campo e geometria de estruturas profundas provenientes de linhas de sísmica de reflexão em áreas vizinhas (Alvarez Marron, 1993,; Klepeis & Austin, 1997) e do Atlântico offshore (Galeazzi, 1998,; Tassone et al., 2001a, 2003,; Lodolo et al., 2002a, 2003,; Yagupsky et al., 2003, em imprensa). O modelo geométrico do duplex profundo que possui a extremidade principal escondida, geometricamente é semelhante às estruturas expostas na parte ocidental da Ilha da Terra do Fogo (Klepeis & Austin, 1997) com os passivos *roofthrust* (topo da zona de falha duplex) e *back-thrust* (falha retro-reversa) criando ao norte do Lago Fagnano uma zona triangular (Figura 27). Os níveis mais baixos apresentam encurtamento de cerca de 40% enquanto os níveis superiores de apenas 20%.

A geometria do MFS no modelo geológico e gravimétrico é semelhante à geometria revelada pelas imagens sísmicas no Atlântico *offshore* e no Estreito de Magalhães (Lodolo et al., 2002a, 2003,; Yagupsky et al., 2003), onde bacias de meio-graben são tipicamente associadas com segmentos distintos do MFS.



(a) ®

Figura 27 - Seção geológica interpretada baseada no modelo numérico gravimétrico combinado dados estruturais e geológicos de campo. Os triângulos na arte superior indicam a loca/izaçflo das estações geofísicas. (1) embasamento Paleozóico; (2) intrusão monzodiorítica (Cretáceo superior-meio do Mioceno); (3) Formação Lemaire (Neojurassico); (4) Formação Yahgan (Neocretaceo, argilito negro e calcário); (5) rochas sedimentares sín-orogénéticas Terciárias, (a) Formação Rto Claro, (b) Grupo La Despedida; e (6) depósitos não diferenciados do Mioceno - Quaternário. A densidades das unidades estão assim separadas: (1) 2.8 glcm3; (2) 2.7 glcm3; (3) 2.45 g/cm3; (4) 2.5 g/cm3; (5) 2.4 glcm3; (6) 2.10-1.0 g/cm3. Tassone et ai. (2005).

7 CONCLUSÃO

Após o levantamento bibliográfico na bacia Austral observou-se uma grande quantidade de artigos descrevendo a geologia da bacia, por se tratar da mais antiga bacia em produção de hidrocarbonetos da região, muitas vezes de forma confusa, com inúmeros nomes para a mesma unidade litológica, por vezes até em uma mesma localidade. Em comum, todos os artigos colocam como as principais rochas reservatórios, as rochas vulcanoclásticas da Formação Tobifera e os sedimentos elásticos da Formação Springhill. Estas duas formações perfazem o principal objetivo prospectivo para hidrocarbonetos na bacia Austral.

Quatro unidades morto-estruturais foram descritos por diversos autores, zona de plataforma (Plataforma de Springhill), zona de flexura ou talude, zona de bacia profunda e zona dobrada (Figura 6). As feições estruturais observadas na bacia Austral são caracterizadas por falhamentos - normais, transcorrentes e cisalhantes -, por dobras assimétricas e por inversão e estruturas compressivas características da zona dobrada.

No estudo de caso dois métodos geofísicos foram aplicados, gravimetria e magnetometria, com objetivo de integrar em conjunto com as informações geológicas e delinear na porção Argentina da Ilha da Terra do Fogo, mais precisamente no sistema de falha Magallanes-Fagnano (MFS), as principais características estruturais e o cenário tectônico da área.

As informações gravimétricas geradas na área de levantamento mostraram que uma seqüência de três mínimos gravimétricos orientados E-W, que estão associados ao sistema de falhas Magallanes-Fagnano. Estes três mínimos

gravimétricos reconhecidos, de acordo com os dados estruturais de campo, são interpretados como bacia "pull-apart" (bacias associadas com movimentos transcorrentes), formadas dentro da zona de deslocamento principal do MFS durante o regime tectônico transtensional.

Uma anomalia gravimétrica máxima, relacionada a uma também anomalia magnética máxima, esta associada ao corpo intrusivo monzodiorítico Hewhoepen. O modelo geofísico, Figura 26, revela uma forma de pistão para este corpo intrusivo cuja posição poderia ser favorecida por uma área de distensão associada com o MFS (Cerrodo et al., 2000). Segundo Tssone *et al.* (2005), a anomalia magnética remanescente indica que a posição original do corpo intrusivo foi tectonicamente modificada, sendo provavelmente os movimentos transtensionais ao longo do MFS responsáveis pela inclinação ao redor do eixo sub-horizontal E-W e um à rotação ao redor do eixo vertical.

O MFS, como indicado pelo modelo gravimétrico 20 e pela seção geológica interpretada, é representado através de falhas subverticais e uma associação a bacias assimétricas, relacionadas aos movimentos transcorrentes e normais extensivos.

Neste trabalho pode-se observar que o método gravimétrico, em conjunto com outros métodos prospectivos, consegue produzir um modelo geológico bastante realístico que poderá ser uma possível área alvo, em outras áreas.

Para o método gravimétrico, fica clara a capacidade de resolver variações laterais de densidade e interfaces verticais/subverticais (como falhamentos e corpos intrusivos). Contudo o mesmo possui dificuldade em mapear variações horizontais, como na individualização das unidades litológicas de uma bacia.

A metodologia utilizada, para o modelamento numérico dos dados apresentados no estudo de caso, resolveu o problema de resolução horizontal, pois para gerar o modelo numérico gravimétrico, os polígonos interpretativos foram criados em função de um conjunto de informações obtidas em coletas de dados de campo (geológicos/estruturais) e na sísmica de reflexão realizadas em áreas vizinhas, ou seja, resolveu-se o problema de resolução horizontal do método com a utilização conjunta e integrada do método gravimétrico com a geologia e outros métodos geofísicos, como pode ser observado no modelo final apresentado na Figura 27.

8 REFERENCIAS BIBLIOGRAFICAS

ALVAREZ-MARRON, J., MCCLAY, K.R., HARAMBOUR, S., ROJAS, L., SKARMETA, J., 1993. Geometry and evolution of the frontal part of the Magallanes foreland thrust and fold belt (Vicunã area), Tierra dei Fuego, southern Chile. **Buli. Am. Assoe. Petrol. Geol.** **11**, 1904-1921.

ARBE, H.A., FANO, F.F.B., 2002. Formación Springhill em el área cuesta afuera. In: Rocas reservorio de las cuencas productivas de la Argentina. **V Congreso de Exploración y Desarrollo de Hidrocarburos**, Mar dei Plata, 2002. p. 75-90.

BLAKELY, R. J., **Potential Theory in Gravity & Magnetic Applications**. Cambridge University Press (1995) - USA

BIDDLE, K T.; MITCHUM, R. M. JR.; FITZGERALD, M. G.; ULIANA, M. A. WRIGHT, R. C. The stratigraphic and structural evolution of the central and eastern Magallanes Basin, southern South America. In: ALLEN, P. A.; HOMEWOOD, P. (eds.) **Foreland Basins, Intern. Ass. Sediment., Special Publ.** Blackwell Sei. Publ, n.8, p.41-61, 1986.

BRAVO, P.; HERRERA, C. Reservorios naturalmente fracturados em rocas volcánicas jurásicas, Cuenca de Magallanes, Chile. VI° Simpósio Bolivariano, Exploración Petrolera em lãs Cuencas Subandinas, 1997, Cartagena de Índias, Colômbia. Memórias, v.1 , p.66-84.

BUATOIS, L.A., CAMACHO, H., 1993. Geologia dei sector noroccidental dei Lago Fagnano, Isla Grande de Tierra dei Fuego. **Revista de la Asociacion Geologica Argentina**, v. 48 (2), p. 109-124.

BUONORA, M. P. P. & DE PAULA, O. B. - 2002 - **Aplicação de Métodos Potenciais na Interpretação Exploratória**. Publicação Interna. Petrobrás. Rio de Janeiro.

BUONORA, M.P.P. **Métodos não sísmicos: teoria de gravimetria e magnetometria**. Publicação Interna. Petrobrás. Rio de Janeiro: Universidade Petrobras, 2007.

CAGNOLATTI, M. J.; MARTINS, R.; VILLAR, H. J. La Formación Lemaire como probable generadora de hidrocarburos em el área Angostura, Provincia de Tierra dei Fuego, Argentina. In: XIII Congresso Geológico Argentino y Ili Congreso de exploración de hidrocarburos. Actas 1.AGA, IAPG, p.123-139, 1996.

CAGNOLATTI, M. J., MILLER, M., 2002. Formación Magallanes. In: Rocas reservorio de las cuencas productivas de la Argentina. **V Congreso de Exploración y Desarrollo de Hidrocarburos**, Mar dei Plata, 2002. p

CERREDO, M.E., TASSONE, A., COREN, F., LODOLO, E., LIPPAI, H., 2000. Postorogenic, Alkaline Magmatism in Ihe Fuegian Andes: the Hewhoepen Intrusive

(Tierra dei Fuego Island), **IX Congreso Geologico Chileno, 2, Puerto Varas, Actas**, p. 192-196.

CUNNINGHAM, W.D., 1993. Strike-slip faults in the southernmost Andes and the development of the Patagonian orocline. **Tectonics**, p. 169-186.

DALZIEL, I.W.D., 1981. Back-arc extension in the southern Andes: a review and critical reappraisal. **Philos. Trans. R. Soc.**, v. A 300, p. 319-335.

DALZIEL, I.W.D., DE WIT, M.J., PALMER, K.F., 1974. Fossil marginal basin in the southern Andes. *Nature* 250, 291-294. de Wit, M.J., 1977. The evolution of the Scotia Arc as a key of the reconstruction of southern Gondwanaland. **Tectonophysics**, v. 37 (1-39), p. 53-82.

DE WIT, M.J., STERN, C.R., 1981, *Variations in the degree of crustal extension during formation of back-arc basin*: **Tectonophysics**, v. 72, p. 229-260.

DECASTELLI, O. O. Posibilidades de generación de hidrocarburos en Cuenca Austral. **Boletín de Informaciones Petroleras**, Buenos Aires, v.1, p.17-32, 1984.

DECASTELLI, O.; ARIAS, W. Niveles carbonosos de la Formación Springhill como generadores de hidrocarburos. In: 1 congr. Nac. Explor. Hidroc. Actas 1. Buenos Aires: IAP, 1989. p.279-302.

DIRAISON, M., COBBOLD, P.R., GAPAIS, D., ROSSELLO, E.A., Le Corre, C., 2000. Cenozoic crustal thickening, wrenching and rifting in the foothills of the southernmost Andes. **Tectonophysics**, v.316, p. 91-119.

DOBRIN, M. 8. ANO SAVIT, C. H., **Introduction to Geophysical Prospecting**. McGraw Hill International Editions (1988) -USA.

ESPITALE, J. et al. Méthode rapide de caractérisation des roches-mères, de leur potentiel pétrolier et de leur degré d'évolution. **Rev. ints. fr. pet.**, v.32, p.23-42, 1977.

FILDANI, A.; COPE, T.; GRAHAM, S. A.; WOODEN, J. L.; Initiation of the Magallanes foreland basin: timing of the southernmost Patagonian Andes orogeny revised by detrital zircon provenance analysis. **Geology**, v.31, n.12, p.1081-1084, 2003.

GALEAZZI, J.S., 1994. **Stratigraphic and structural evolution of the western Malvinas and southeastern Magallanes basins**. Unpublished MS thesis, Rice University, Houston, p. 149.

GALEAZZI, J. S. Structural and stratigraphic evolution of the western Malvinas Basin, Argentina. **American Association of Petroleum Geologists Bulletin**, v.82, n.4, p.594-636, 1998.

GANTAR, R., 1993. Ties to Harbour Bases for Drift, Scale and Datum Determination in Antarctic Marine Gravity Profiles, **Bollettino di Geofisica Teorica ed Applicata**, v.xx.xv, p. 137-138.

GONZALEZ, L.; HERRERO, C.; KELM, U. Springhill Formation, Magellan Basin, Chile: formation water characteristics and mineralogy. **Marine and Petroleum Geology**, v.15, n.7, p.651-666, 1998.

GOTZE, H.J., 1978. Ein numerisches Verfahren zur Berechnung der gravimetrischen Feldgrößen drei dimensionaler Modelle. **Arch. Met. Geophys. Biokl. A**, v. 25, p. 195-15.

GOTZE, H.J., LAHMEYER, B., 1988. Application of three dimensional interactive modeling in gravity and magnetics. **Geophysics**, v. 53 (8), p. 1096-1108.

GRIEM-KLEE, SUSANNE. **Exploraciones Mineras - Universidad de Atacama**. Atacama. Disponível em: < <http://plata.uda.cl/minas/apuntes/Geologia/EXPLORAC/TEXT/06001grav.html#6.%20Gravimetría> >. Acesso em: 06.07.2007.

KLEPEIS, K.A., AUSTIN, J.A., 1997. Contrasting styles of superposed deformation in the southernmost Andes. **Tectonics**, v. 16, p. 755-776.

HARAMBOUR, S.M., 1998. **Structural evolution of the Magallanes Block, Magallanes (Austral) Basin, offshore Argentina, South Atlantic**. Unpublished MSc thesis, Royal Holloway, University of London, p. 136.

HARAMBOUR, S.M., SOFFIA, J.M., 1988. Transición desde margen pasivo a cuenca de antepaíses: modelo de evolución para el extremo norte de Última Esperanza, Magallanes. **V Congreso Geológico Chileno**, Acta 1, p. 385-402.

HERVÉ, F., DAVISON, J., GODOY, E., MPODOZIS, C.M., COVACEVICH, V., 1981. The Late Paleozoic in Chile: stratigraphic, structure, and possible tectonic framework. **Academia Brasileira de Ciências**, Anais 53, p. 361-373.

HECHEM, J.; E HOMOVIC, J. Fácies e paleoambientes volcánoclasticos en el Nesocratón Dei Deseado. **Boletín de Informaciones Petroleras**, Tercera Época, año V, n.16, 1988.

HINTERWIMER, G., 2002. "Serie Tobifera". In: Rocas reservorio de las cuencas productivas de la Argentina. **V Congreso de Exploración y Desarrollo de Hidrocarburos**, Mar del Plata, 2002. p. 27-48.

LAST, B. J. AND KUBIK, K., Compact Gravity Inversion. **Geophysics**, 48 (1983),713-721

LODOLO, E., MENICETTI, M., TASSONE, A., GELETTI, R., STERZAI, P., LIPPAI, H., HORMAECHEA, J.L., 2002a. Researchers target a continental transform fault in Tierra del Fuego. **EOS Trans. AGU** 83 (1), 1-6.

- LODOLO, E., MENICHETTI, M., TASSONE, A., STERZAI, P., 2002b. Morphostructure of the Central-Eastern Tierra dei Fuego Island from Geological Data and Remote-Sensing images, Stephan Mueller Special Publication Series 2. **European Geophysical Society**, pp. 1-16.
- LODOLO, E., MENICHETTI, M., BARTOLE, R., BEN-AVRAHAM, Z., TASSONE, A., LIPPAI, H., 2003. Magallanes-Fagnano continental transform fault Tier'a dei Fuego, Southemmost South America. **Tectonics** **22** (6), 1076
- LUIZ, J.G. & SILVA, L.M.C - 1995- **Geofísica de Prospecção**. Belém: Cejup, 311p.
- MARINELLI, R. V. Distribución de campos productores de hidrocarburos en el área de plataforma cuenca Austral: su relación com antiguas líneas de costa. Primer Congreso Nacional de Hidrocarburos, Petróleo y Gás. v.Exploración, p.209-216, 1982.
- MENICHETTI, M., LODOLO, E., TASSONE, A., GELETTI, R., 2001. Neotectonics at the Continental Transform Boundary of the South America-Scotia Plates: the Magallanes-Fagnano Fault System. Terra Antartica Publication 'Antartic Neotectonic' Workshop, **Siena**, **55**.
- MILLER, M.L., CAGNOLATTI, M.J. Sistema Petrolero de la Cuenca Austral. In: IV Congreso de Exploración de Hidrocarburos, **Simpósio de Sistemas Petroleros de las Cuencas Argentinas**, 1998, Mar dei Plata. p. 239-262.
- MORELLI, C., GANTAR, C., HONKASALO, T., MCCONNELL, R.K., TANNER, I.G., SZABO, 8., UOTILA, U., WHALEN, C.T., 1971. The Intematinal Gravity Standardization Net 1971, **International Association of Geodesy Special Publication**, v.4, p. 194
- NATLAND, M.L., GONZALEZ, E., CANON, A., ERNST, M., 1974. A system of stages for correlation of Magallanes Basin sediments, **Memoir Geological Society of America**, v.139. p. 126.
- NETTLETON, L L., **Gravity and Magnetics in Oil Prospecting**. McGraw Hill Book Com pany(1976)-USA.
- OLIVERO, E.B., 2002. Petrograf1'a sedimentaria de sistemas turbid1'ticos dei Creta'cico-Paleo·geno. Andes Fueguinos: Procedencia, Volcanismo y deformacio·n, **Actas XV Congreso Geologico Argentino. Actas** 1, p. 611-612.
- OLIVERO, E.B., MARTINIONI, D.R., 2001. A review of the geology of the Argentinian Fuegian Andes. **J. South Am. Earth Sei.**, v.14, p. 175-188.
- OLIVERO, E.B., MEDINA, F.A., 2001. Geolog1·a y paleontolog1·a dei Cretacico marino en el sureste de los Andes Fueguinos, Argentina. **Revista de la Asociacion Geologica Argentina**, v. 56 (3), p. 344-352.

OLIVERO, E.8., MARTINIONI, D.R., MALUMIAN, N., PALAMARCZUCK, S., 1999. Bosquejo geológico de la Isla Grande de Tierra del Fuego. Argentina, **Actas XIV Congreso Geológico Argentino**, p. 291-294.

PALMA, M. A. **Evolución geológica del Macizo del Deseado**. 1987. 225p. Tese de doctorado, Universidad Nacional de La Plata, La Plata, Argentina.

PANKHURST, R.J., RILEY, R.R., FANNING, C.M., KELLEY, S.P., 2000. Episodic silicic volcanism in Patagonia and the Antarctic Peninsula: chronology of magmatism associated with the break-up of Gondwana. **J. Petrol.**, v. 41 (5), p. 605-625.

PERDOMO, R., HORMAECHEA, J.L., DEL COGLIANO, O., 2002. Tectonic studies with GPS in Tierra del Fuego, **Simposio International Association of Geodesy**, 'Deformación reciente de la corteza terrestre en Sudamérica y regiones adyacentes,' Santiago, Chile (October 21-25).

PERONI, G., CAGNOLATTI, M., PEDRAZZINI M., 2002. Cuenca Austral: Marco geológico y reseña histórica de la actividad petrolera. In: Rocas reservorio de las cuencas productivas de la Argentina. **V Congreso de Exploración y Desarrollo de Hidrocarburos**, Mar del Plata, 2002. p. 11-20.

PEDRAZZINI, M., CAGNOLATTI, M., 2002. Formación Springhill en el territorio continental. In: Rocas reservorio de las cuencas productivas de la Argentina. **V Congreso de Exploración y Desarrollo de Hidrocarburos**, Mar del Plata, 2002. p. 49-74.

PITTON, J.L.; ARBE, H.A. Sistema petrolero de la Cuenca Austral. In: Congreso de Exploración y Desarrollo de Hidrocarburos, Mar del Plata, Argentina. Adas, n.4, v.1, p.506, 1999

QUATTROCCHIO, M.; MARTINEZ, M.A.; CARPINELLI PAVISICH, A.; VOLKHEIMER, W. Early Cretaceous palynostratigraphy, palynofacies and paleoenvironments of well sections in northeastern Tierra del Fuego, Argentina. **Cretaceous research**, v.27, p.584-602, 2006.

RAMOS, V. A. Andean Foothills Structures in the Northern Magallanes Basin, Argentina. **American Association of Petroleum Geologists Bulletin**, v.73, n.7, p.887-903, 1989.

RAMOS, V. A. Evolución tectónica y metalogénesis de la Cordillera Patagónica. In: II Congreso Nacional Geología Económica. Actas. v.1, p.108-124, 1983.

RAMOS, V. A. Geología de la región del lago Cardiel, provincia de Santa Cruz. **Asociación Geológica Argentina Revista**, v.37, p.23-49, 1982.

RAMOS, V. A. Paleontología y edad de la Formación Springhill. In: **1 Congreso Geológico Chileno**. Adas. v.1 C, p.41-56, 1976.

RAMOS, V. A. Tectónica de la región Dei Rio e Lago Belgrano, Cordillera Patagónica - Argentina. In: li **Congreso Geológico Chileno**. Actas. v.1 B, p.1-32, 1979.

RAMOS, V. A.; NEMEYER, H.; SKARMETA, J.; E MUNOZ, J. The magmatic evolution of the Austral Patagonian Andes. **Earth Science Reviews**, v.18, p.411-443, 1982.

ROBBIANO, J.A.; ARBE, H.A.; GANGUI, A. Cuenca Austral marina. In: RAMOS, V. A.; TURIC, M. A (eds.). **Geología y recursos naturales de la plataforma continental argentina**. XIII Congreso Geológico Argentino y Ili Congreso de Exploración de Hidrocarburos, Plataforma Continental Argentina, Buenos Aires: Asociacion Geologica Argentina, Instituto Argentino dei Petroleo, 1996, p.323-342.

SANDWELL, D.T., 1995. Ocean basin tectonics revealed with declassified Geosat altimeter data. **EOS Trans. AGU** 76 (46), 149.

SANCHEZ, J., 1999. **Sedimentacion y paleogeografla de la Formacion Springhill en la Boca Oriental dei Estrecho de Magallanes, Argentina**. Universidad de Chile, Facultad de Ciencias Físicas y Matematicas, Departamento de Geologia, p. 94.

SCHMIDT, S., GOTZE, H. J., 1998. Integration of data constraints and potential field modeling. **Phys. Chem. Earth A** 24 (3), 191-196.

SCHIUMA, M., HINTERWIMMER, G.; VERGANI, G. Y. G. Rocas reservorio de las cuencas productivas de la Argentina. **V Congreso de Exploración y Desarrollo de Hidrocarburos**, Mar dei Plata, 2002.

SCHENCK, C.J., VIGER, R.J., ANDERSON C.P., 1997. Maps showing geology, oil and gas fields and geologic provinces of the South Amarica region. **U.S. Geological Survey Open-File Report 97-470D**.

SILVA, J. B. C., MEDEIROS, W. E ANO BARBOSA, V. C. F., Potential -field Inversion: Choosing the Appropriate Technique to Solve a Geologic Problem. **Geophysics**, 66(2001), 511-520

SILVA, J. B. C., MEDEIROS, W. E ANO BARBOSA, V. C. F., Practical Applications of Uniqueness Theorems in Gravimetry: Part 1- Constructing Sound Interpretation Methods. **Geophysics**, 67(2002), 788-794

TALWANI, M., ANO EWING, M., Rapid Computation of Gravitational Attraction of Three-dimensional Bodies of Arbitrary Shape. **Geophysics**, 25(1960), 203-252

TASSONE, A.A., LODOLO, E., TESAC GROUP, LIPPAL, H., ZANOLLA, C., HORMAECHEA, J.L., COREN, F., VIDMAR, R., RINALDI, C., 1999. Indicadores geofísicos sobre la localizacion dei limite entre las placas Sud America- Scotia en Tierra dei Fuego (Argentina), **XIV Congreso Geologico Argentino. Salta. Actas** 1, p. 326-329.

TASSONE ET AL. / **Journal of South American Earth Sciences** 108 19 (2005) 99-109

TASSONE, A, LODOLO, E., LIPPAI, H., COMINGUEZ, A., FOSTER, M., GELETTI, R., MENICHETTI, M., 2001a. **Seismic Study of the Magallanes Fold-and-Thrust Belt, Southern Argentinean Continental Margin: Preliminary Results**, XV Congreso Latinoamericano de Geología. Simposio sobre evolución geológica de los Andes. Montevideo, Uruguay, (CD and Abstract, 8).

TASSONE, A, LODOLO, E., LIPPAI, H., HORMAECHEA, J.L., MENICHETTI, M., FERRER, C., CONNON, G., 2001 b. **Bathymetric survey of Lago Fagnano. Tierra dei Fuego Island**, Argentina, XV Congreso Latinoamericano de Geología. Simposio sobre evolución geológica de los Andes. Montevideo, Uruguay 2001 (CD and Abstract, 9-10).

TASSONE, A, LIPPAI, H., LODOLO, E., COMBA, A., HORMAECHEA, J.L., MENICHETTI, M., VILAS, J.F., 2005. f. geological and geophysical crustal section across the Magallanes-Fagnano Fault in Tierra dei Fuego. **Journal of South America Earth Sciences**, v. 19, p. 99-109.

TELFORD, W.D.; GELDART, L.P.; SHERIFF, R.E. **Applied Geophysics**. 2ed. New York: Cambridge University Press, 2004. ISBN 0-521-33938-3.

THOMAS, C. Geology and petroleum exploration in Magallanes province, Chile. **American Association of Petroleum Geologists Bulletin**, v.33, p.1553-1578, 1949.

ULIANA, M.; BIDDLE, K.; PHELPS, D.; GUST, D. Significado dei volcanismo y extensión mesojurásico en el extremo meridional de Sudamérica. **Asociación Geológica Argentina**, v.40, n.3-4, p.231-253, 1986.

URIEN, C.M., ZAMBRANO, J.J., AND YRIGOYEN, M.R., 1995, Petroleum basins of southern South America: an overview, in Tankard, A.J., Suarez S., R., and Welsink, H.J., eds., Petroleum basins of South America: **American Association of Petroleum Geologists Memoir**, v. 62, p. 63-77

VILLAR, H. J. & ARBE H. A. Oil generation in the Esperanza Area, Austral Basin, Argentina. In: III Latinoam. Congr. Org. Geochem., 1992, Manaus. Extended Abstracts. MELLO M. R.; TRINDADE L. A. F., 1993. p.150-153

WEST, ROBERT E. The land gravity exploration method. In: Blaricom, Richard Van; **Practical Geophysics** II: for the exploration geologist. 1ed. Spokane: Northwest Mining Association, 1992. cap.03. ISBN 0-931986-05-2.

WINSLOW, M.A., 1982. The structural evolution of the Magallanes Basin and neotectonics in the southernmost Andes. In: Craddock, C. (Ed.), Antarctic Geoscience. **University of Wisconsin Press**, Madison. p. 143-154.

WON, I.J., BEVIS, M., 1987. Computing the gravitational and magnetic anomalies due to a polygon: algorithms and Fortran subroutines. **Geophysics** 52, 232-238.

YAGUPSKY, D., TASSONE, A., LODOLO, E., VILAS, J.F., LIPPAL, H., 2003. **Estudio sismoestratigrafico dei sector sudoccidental de la cuenca de antepa1s de Malvinas. Margen continental atlantico.** Argentina, 10º Congreso Geoloico Chileno, Concepcion 2003. p. 10(CD).

YAGUPSKY, D., TASSONE, A., LODOLO, E., MENICHETTI, M., VILAS, J.F., 2004. Seismic Imaging of the Magallanes-Fagnano Fault System, SW Atlantic Ocean. Bollettino di Geof1sica teorica ed applicata, **supplement GeoSur**, v. 45 (2), p. 47-49.