

**José Jorge Brum Cardoso**

**ANÁLISE DE UMA ESTRUTURA DE PROGRAMAÇÃO PARA INTERPRETAÇÃO  
MAGNÉTICA EM CÓDIGO FONTE ABERTO E UMA POSSÍVEL APLICAÇÃO NA  
BACIA DE SALTA**

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



MGL  
C268A

BRUM, José Jorge Cardoso

Análise de uma estrutura de programação para interpretação magnética em código fonte aberto e uma possível aplicação na bacia de salta / José Jorge Bnun Cardoso -- Rio de Janeiro: UFRJ/ IGeo, 2007.

xv, 119 p.: il.; 30cm

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

Orientadores: Paula Lúcia Ferrucio da Rocha

1. Geofísica. 2. Geologia de Engenharia e Ambiental - Trabalho de Conclusão de Curso. I Nome, Sobrenomes do orientador da UFRJ. II Universidade Federal do Rio de Janeiro, Instituto de Geociências, Programa de Pós-graduação em Geologia. III. Título.

José Jorge Brum Cardoso

**ANÁLISE DE UMA ESTRUTURA DE PROGRAMAÇÃO PARA INTERPRETAÇÃO  
MAGNÉTICA EM CÓDIGO FONTE ABERTO E UMA POSSÍVEL APLICAÇÃO NA  
BACIA DE SALTA**

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:

Por:

---

Álvaro Lúcio de Oliveira Gomes

---

Leonardo Fonseca Borghi de Almeida

---

Paula Lúcia Ferrucio da Rocha

UFRJ  
Rio de Janeiro  
2007

A meus pais, José Jorge e Fátima,  
à minha irmã Ana Lúcia e  
à minha noiva Marcela.

## Agradecimentos

Agradecer é teoricamente a parte mais fácil do trabalho como um todo. Ou, pelo menos, deveria ser. Só que são tantos os nomes que deveriam constar aqui que fica impossível uma homenagem, um agradecimento justo a todos os que, de alguma forma, contribuíram para o resultado final desse trabalho.

Bem, acho que começar agradecendo a Deus seja o mais lógico. Se é que existe alguma lógica nessa frase. Seguindo a hierarquia, meus pais: José Jorge Teixeira Cardoso e Maria de Fátima Brum Cardoso. Minha irmã, Ana Lúcia Brum Cardoso e Minha Noiva, Marcela Oliveira. A partir desse ponto, representarei toda a família pelos nomes dos meus avôs e avós paterno/materna: Dalva Barbosa Brum e Mário Ignácio Brum (*in memoriam*) e José teixiera Cardoso (*in memoriam*) e Isaura de Lemos Cardoso (*in memoriam*). Espero que todos se sintam homenageados.

Também quero agradecer à Adelina Serpa Arruda e Luis Alves Arruda (*in memoriam*), que são mais do que amigos, são avô e avó por escolha e afinidade.

Agradeço também aos meus muitos amigos e colegas, entre eles, Rodrigo Fernandes, Eduardo Marques e todos os colegas de curso da UP/PETROBRAS.

Agradeço enormemente a UP/PETROBRAS e a PETROBRAS por acreditar em mim e me proporcionar esse momento.

Agradeço a Universidade do Brasil/UFRJ e seus profissionais por terem me guiado até aqui e , tenho certeza, ainda hão de me guiar muito mais longe na longa estrada do conhecimento.

Obrigado!

*Não importa aonde vais. Vá e leva teu coração.*  
**(Confúcius 551 ac- 479 ac)**

## RESUMO

BRUM, José Jorge Cardoso. **Análise de uma estrutura de programação para interpretação magnética em código fonte aberto e uma possível aplicação na bacia de salta.** 2007. xv, 119p. Trabalho de Conclusão de Curso (Especialização em Geofísica do Petróleo) - Programa de Pós-graduação em Geologia, Instituto de Geociências, Universidade Federal do Rio de Janeiro, Rio de Janeiro.

Este trabalho foi dividido em três partes. A primeira, uma introdução aos principais aspectos geológicos da bacia de Salta, como litologia e estratigrafia e geologia do petróleo. Na segunda parte, uma breve revisão do método magnético foi proposta e os aspectos teóricos mais relevantes foram apresentados, bem como o histórico de utilizações pela indústria do petróleo. Ao final do capítulo, destacam-se os instrumentos utilizados e os principais métodos de aquisição de dados. Por fim, o algoritmo desenvolvido para auxiliar nas interpretações magnéticas através do uso de inversão magnética foi apresentado para se estimar a localização de objetos em subsuperfície. Como objetivo final deste trabalho foi proposta a utilização dessa ferramenta computacional para a bacia de salta, já que até o presente momento, não foram encontradas publicações com o método magnético de investigações nessa bacia.

Palavras-chave: bacia de Salta; Magnetometria; Inversão magnética.

## ABSTRACT

BRUM, José Jorge Cardoso. **Análise de uma estrutura de programação para interpretação magnética em código fonte aberto e uma possível aplicação na bacia de salta.** 2007. xv, 119p. Trabalho de Conclusão de Curso (Especialização em Geofísica do Petróleo) - Programa de Pós-graduação em Geologia, Instituto de Geociências, Universidade Federal do Rio de Janeiro, Rio de Janeiro.

This work was separated in three parts. The first one is an introduction to the main geological aspects of the Salta basin, as lithology and stratigraphic aspects and petroleum geology. In the second part, a revision of the magnetic method was proposed and the principal aspects were presented, as well as the description of its usage by the oil industry. At the third part, a discussion about the applicability of the toolkit in the Salta Basin takes place, since there is no encountered works on that basin until nowadays.

Key-Words: Salta basin; Magnetometry; Magnetic Inversion



## Índice de Figuras

<i>Figura 1 - Localização geográfica da Bacia de Salta.....</i>	<i>16</i>
<i>Figura 2 - Distribuição dos depocentros do Subgrupo Pirgua (Sabino, 2004).....</i>	<i>20</i>
<i>Figura 3 - Coluna estratigráfica da bacia de Salta (Gómez Omil &amp; Boll, 1999).....</i>	<i>21</i>
<i>Figura 4 - Diagrama cronoestratigráfico onde se observam as principais discordâncias do Grupo Salta (dei Papa &amp; Salfity, 1999).....</i>	<i>22</i>
<i>Figura 5 -Linha sísmica regional. Sub-bacia Lomas de O/medo, Flanco Sul (Disalvo, 2005).....</i>	<i>23</i>
<i>Figura 6 -Subgrupo Balbuena: seqüência sedimentar pós-rifle (Formações Lecho, Yacoraité e Olmedo / El Tuna!, e Membro Salino). Modificada de Salfity &amp; Marquillas (1999).....</i>	<i>25</i>
<i>Figura 7 -Evolução paleo-ambiental das formações do Grupo Salta. Modificada Salfity &amp; Marquillas (1999).....</i>	<i>27</i>
<i>Figura 8 - Esquema (sem escala) dos principais eventos de inundação durante a deposição do Grupo Salta. Modificada de Salfity &amp; Marquillas (1999).....</i>	<i>31</i>
<i>Figura 9 - Subgrupo Santa Bárbara: finalização da sedimentação pós-rifle (Formações Mealla, Maíz Gordo e Lumbrera). Modificada de Salfity &amp; Marquillas (1999).....</i>	<i>32</i>
<i>Figura 10-Perfil geológico-estrutural da Sub-bacia de Lomas de O/medo. Nota-se a assimetria do sistema de rifle. Fonte: Comínguez e Ramos, 1995.....</i>	<i>36</i>
<i>Figura 11 -Seção esquemática do rifle Lomas de O/medo. (a) Reconstrução do entumecimento local pretérito à abertura do rifle; (b) Estrutura do rifle anterior a inversão tectônica andina (Comínguez &amp; Ramos, 1995).....</i>	<i>38</i>
<i>Figura 12 -Ambientes tectônicos da Bacia de Salta (Gómez Omil &amp; Boll, 2005).....</i>	<i>40</i>
<i>Figura 13 -Margem convergente andina e margens transforme norte e sul (Milani &amp; Thomaz Filho, 2000).....</i>	<i>43</i>
<i>Figura 14 -Esquema tectônico da Bacia de Salta e regiões adjacentes em tempos pré Maastrichtianos. (1) Borda da bacia; (2) Depocentro cretáceo não marinho; (3) Falhas e lineamentos atuais; (4) Distribuição do magmatismo Serra Geral (Jurássico superior-Neocomiano); (5) Arco magmático cretáceo-eoceno; (6) Bacia marinha de la costa</i>	

<i>(Tithoniano- Neocomiano); (7) Nome da bacia. Lineamentos: T- Tomasito, LB - Los Blancos, SG - Salinas Grandes, Co - Cobres, C- Calama, O - Olapacato, Cq - Calchaquí, I - Isonza, EB - El Brete, Aq - Aconquija. Fonte: Salfity &amp; Marquillas, 1999.....</i>	<i>44</i>
<i>Figura 15 - Principais sistemas orogênicos desenvolvidos na Argentina: a) Área abrangida pela orogenia andina; b) Principais registros das orogenias pré-andinas (Ramos, 1999)...</i>	<i>46</i>
<i>Figura 16 - Tipo de querogênio da Formação Yacoraite e potencial de geração de hidrocarbonetos (Gómez Omil &amp; Boll, 1999).....</i>	<i>48</i>
<i>Figura 17 - Diagrama de número de amostras pelo conteúdo de COT na Formação Yacoraite. Nota-se o predomínio de amostras com baixa porcentagem de COT (Gómez Omil &amp; Boll, 1999).....</i>	<i>49</i>
<i>Figura 18 - Localização dos principais campos produtores da região do noroeste argentino (Disalvo, 2002).....</i>	<i>50</i>
<i>Figura 19 - Ambientes tectônicos da Bacia de Salta (Gómez Omil &amp; Boll, 2005).....</i>	<i>52</i>
<i>Figura 20 - Modelo de trapas combinadas - estruturais e estratigráficas. (Gómez Omil &amp; Boll, 2005).....</i>	<i>62</i>
<i>Figura 21 - Modelo de trapas estratigráficas em platôs de rochas vulcânicas (Disalvo et al., 2002b).....</i>	<i>63</i>
<i>Figura 22 - Modelo de geração (curva de subsidência) de hidrocarbonetos nos principais depocentros. (Modificado de Gómez Omil &amp; Boll, 1999).....</i>	<i>66</i>
<i>Figura 23 - Modelo de acumulação de hidrocarbonetos na Formação Yacoraite em trapas estruturais. (Gómez Omil &amp; Boll, 2005).....</i>	<i>67</i>
<i>Figura 24 - Sistema Petrolífero Yacoraite - Palmar Largo. (Modificado de Luquez &amp; Palma, 1998).....</i>	<i>68</i>
<i>Figura 25 - Diagrama de eventos dos sistemas petrolíferos Yacoraite-Yacoraite (!) e Yacoraite- Lomas de O/medo nos três depocentros da Bacia de Salta (Traduzido de Gómez Omil &amp; Boll, 1999).....</i>	<i>68</i>
<i>Figura 26 - Representação do momento de dipolo magnético (Luiz, 1995).....</i>	<i>79</i>
<i>Figura 27 - Curva de Histerese.....</i>	<i>83</i>
<i>Figura 28 - representação esquemática do dipolo aproximado para o campo terrestre (Luiz, 1995).....</i>	<i>85</i>

<i>Figura 29 - representação geométrica do campo magnético terrestre e seus elementos. (Luiz, 1995).....</i>	<i>86</i>
<i>Figura 30 - classes de Objetos e Dados.....</i>	<i>102</i>
<i>Figura 31 - Fluxograma Computacional.....</i>	<i>104</i>
<i>Figura 32 - Sensores inferior e superior.....</i>	<i>105</i>
<i>Figura 33 - campo total ao longo de três linhas paralelas.....</i>	<i>107</i>
<i>Figura 34 - configurações dos sensores. a) campo total em dois níveis e b) campo total com vetor de gradiente de campo. ....</i>	<i>108</i>
<i>Figura 35 - Campo total em 2-níveis.....</i>	<i>108</i>
<i>Figura 36 - Perfil do gradiente vertical.....</i>	<i>109</i>
<i>Figura 37 - valor absoluto do gradiente medido com separação de 0,5 m.....</i>	<i>111</i>
<i>Figura 38 - Resultados de inversão para o gradiente vertical. a) Coordenadas XY constantes e b) coordenadas XY com desvios programados.....</i>	<i>113</i>

## Índice de Tabelas

<i>Tabela 1- Equações de Maxwell.....</i>	<i>78</i>
<i>Tabela 2 -Parâmetros estimados para simulação numérica.....</i>	<i>111</i>
<i>Tabela 3 -Resultados da inversão com medidas de gradiente.....</i>	<i>114</i>

# Índice

Agradecimentos.....	vi
<u>Resumo.....</u>	<u>viii</u>
<u>Abstract.....</u>	<u>ix</u>
<u>1 Introdução.....</u>	<u>16</u>
<u>2 Objetivo.....</u>	<u>18</u>
<u>3 Contexto Geológico.....</u>	<u>19</u>
3.1 Aspectos Gerais.....	19
3.1.1 Subgrupo Pirgua.....	23
3.1.2.1 Formação Lecho.....	26
3.1.2.2 Formação Yacoraite.....	28
3.1.2.3 Formação Olmedo.....	30
3.1.3 Subgrupo Santa Bárbara.....	32
3.2 Arcabouço estrutural e evolução tectônica.....	34
3.2.1 Introdução.....	34
3.4 Geologia do petróleo.....	47
3.4.3.2 Reservatórios fraturados.....	51
3.4.3.3 Campo de Caimancito.....	54
3.4.3.4 Reservatórios não fraturados.....	55
3.4.3.5 Reservatórios clásticos.....	56
3.4.3.6 Reservatórios carbonáticos.....	57
3.4.3.7 Campos do Flanco Sul.....	58
3.4.3.8 Reservatórios das formações Palmar Largo e La Tigra.....	60
3.4.4 Rocha selante.....	61
3.4.5 Trapas.....	62
3.4.6 Geração, migração e acumulação.....	65
3.5 Histórico de produção de hidrocarbonetos.....	70
3.5.1 Flanco sul.....	72
4 FUNDAMENTOS TEÓRICOS.....	75
4.1 Magnetometria.....	75
4.1.1 Fundamentos Teóricos.....	76
4.1.2 Momento de dipolo Magnético.....	78

4.1.3 Campo Magnético e Força Magnética.....	78
4.1.5 Relação B-H: A curva de Histerese.....•.....	81
4.1.6 Potencial Magnético.....	82
4.1.7 O campo Magnético Terrestre.....	83
4.1.8 Natureza do campo geomagnético.....	85
4.1.9 Magnetismo dos Materiais.....	86
4.1.10 Magnetização das Rochas.....	86
4.1.11 Instrumentos de Medição - Magnetômetros.....	87
4.1.11.1 Magnetômetro de Saturação (Flux-Gate) .....	88
4.1.11.2 Magnetômetro de Precessão Nuclear.....	88
4.1.11.3 Bombeamento óptico.....	90
4.1.11.4 Gradiômetros.....	91
4.1.12.1 Levantamento Aéreo.....	92
4.1.12.2 Levantamento Marítimo.....	95
4.1.12.3 Levantamento Terrestre.....	95
c)Correções.....	97
e)Filtragens.....	98
5 Estudo de Caso.....	99
5.1.1 Implementação de inversão: princípios básicos.....	100
5.2 Esboço da implementação de inversão .....	101
5.2.1 Vista geral da Implementação.....	101
5.3 Uso da Estrutura - adaptação da estrutura de inversão.....	102
5.4 Aplicações.....	102
5.5 Medidas dos Campos de Gradiente.....	111
5.6 Conclusões.....	114
6 Conclusões.....	115
7 Referencias Bibliográficas.....	116



onde os melhores afloramentos são evidentes ao norte das Serras Pampeanas, Serras Subandinas, e na Cordilheira Central. Em subsuperfície a bacia estende-se até o oeste do Paraguai onde é denominada Bacia Pirity.

A origem da Bacia de Salta é tipicamente distensiva desenvolvida entre o Cretáceo Inferior e o Eoceno, onde zonas de sutura preexistentes do Proterozóico Superior - Cambriano Inferior de direção ENE-WSW, mergulhando para NNW, controlaram a direção das falhas de um sistema de rifle, as quais conformaram um complexo conjunto de grabens, limitados por grandes falhas nas bordas. Foram acomodados sedimentos elásticos e carbonáticos com intercalações de rochas ígneas cuja espessura total pode ultrapassar 5000 m nos maiores depocentros. Os principais depocentros são denominados Tres Cruces, Lemas de Olmedo, Metán, Alemania, Cerro Hermoso, El Rey e El Charco ou Sey.

A principal fonte exploratória de hidrocarbonetos da Bacia de Salta é o Sistema Petrolífero Yacoraite-Yacoraite. Os principais reservatórios são constituídos de carbonatos fraturados localizados nos ápices das dobras formadas a partir de falhas de cavalgamento principalmente na Sub-bacia Lamas de Olmedo.



## 2 OBJETIVO

O objetivo deste trabalho consiste em realizar uma breve análise da geologia da Bacia de Salta, apresentando estudos encontrados na literatura com a aplicação de um método geofísico na análise desta bacia.

Com relação à geologia, a bibliografia existente é muito extensa e complexa. Logo, nossa intenção não foi de esgotar o assunto, mas incluir os aspectos gerais da bacia de forma a auxiliar na compreensão do estudo de casos.

Tendo em vista o objetivo acima, o texto foi dividido em duas partes. A primeira parte trata do contexto geológico da bacia e na segunda parte temos a descrição do levantamento bibliográfico realizado, sobre o método geofísico de interesse e a discussão do conteúdo, resultados e conclusões dos trabalhos selecionados na literatura.

Ao final, apresentamos na conclusão as questões em aberto e críticas sobre os artigos encontrados na literatura.

### 3 CONTEXTO GEOLÓGICO

#### 3.1 Aspectos Gerais

A Bacia de Salta (Turner, 1959) de idade cretácea, localizada no noroeste argentino, constitui uma típica bacia rifle por sua estrutura, pelas características do relevo sedimentar e pelo magmatismo associado (Bianucci *et al.*, 1981; Salfity & Marquillas, 1994).

Na bacia em questão reconheceu-se através de métodos geofísicos e pelas medidas de espessuras em diversos locais os depocentros de Sey, Tres Cruces, Cianzo, Cerro Formoso, Lomas de Olmedo, El Rey, Metán, Tucuman, Alemania e Brealito. Esses depocentros se conectam através de elementos menos profundos e estreitos (umbrais) posicionados entre as bordas da bacia e um alto estrutural interno e central, denominado dorsal Salta-Jujuy (Figura 2).

A Bacia de Salta é limitada por estruturas positivas (arcos de Quirquincho e Pampeano a leste, Transpampeano-Púnico e Huaytiquina a oeste e a dorsal de San Pablo e arcos Condor e Michicola a norte) (Reyes & Salfity, 1973).



Yacoraite Olmedo e o Subgrupo Santa Bárbara pelas formações Mealla, Maiz Gordo e Lumbreira.

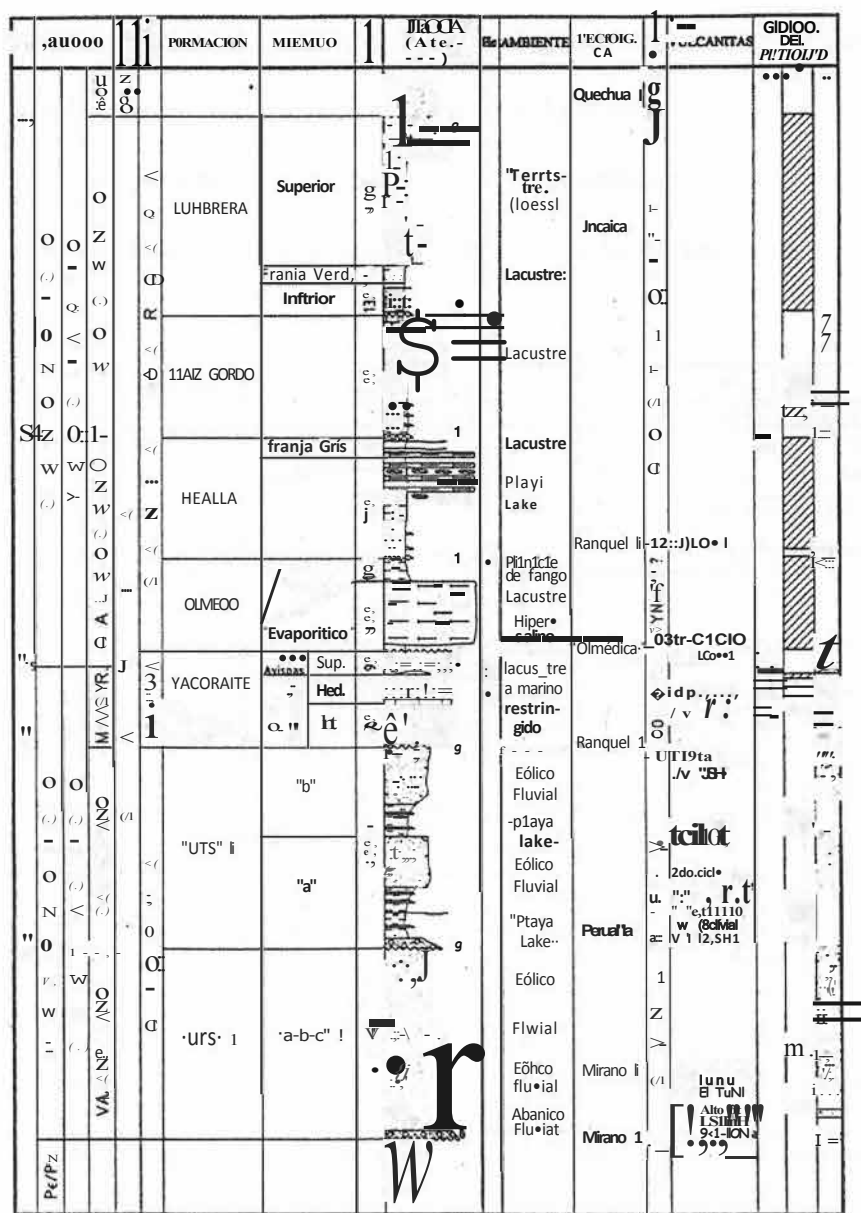


Figura 3 - Coluna estratigráfica da bacia de Salta (Gómez Omil & Boll, 1999).

A Bacia de Salta evoluiu segundo duas fases tectônicas, sinrifte e pós-rifte (Figura 4 e Figura 5). A primeira fase corresponde à etapa de ruptura ou rifteamento e está dominada por sedimentação de origem continental, possui milhares de metros de espessura de rochas conhecidas como subgrupo Pargua. A segunda fase se desenvolve quando a distensão cessou e o processo dominante foi à subsidência tectônica.

As rochas depositadas nesse segundo ciclo constituem os sedimentos do pós-rifte e foram denominadas de subgrupos Balbuena e Santa Bárbara (Sabino, 2004).

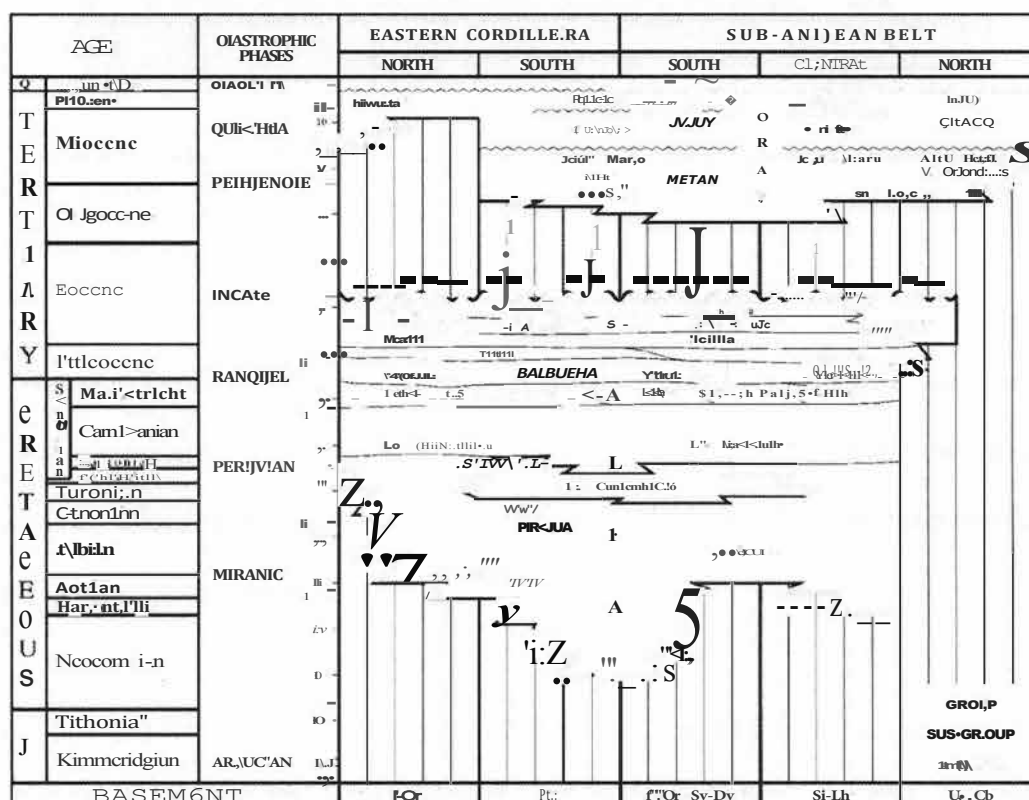


Figura 4 - Diagrama cronoestratigráfico onde se observam as principais discordâncias do Grupo Salta (de Papa & Salfity, 1999).

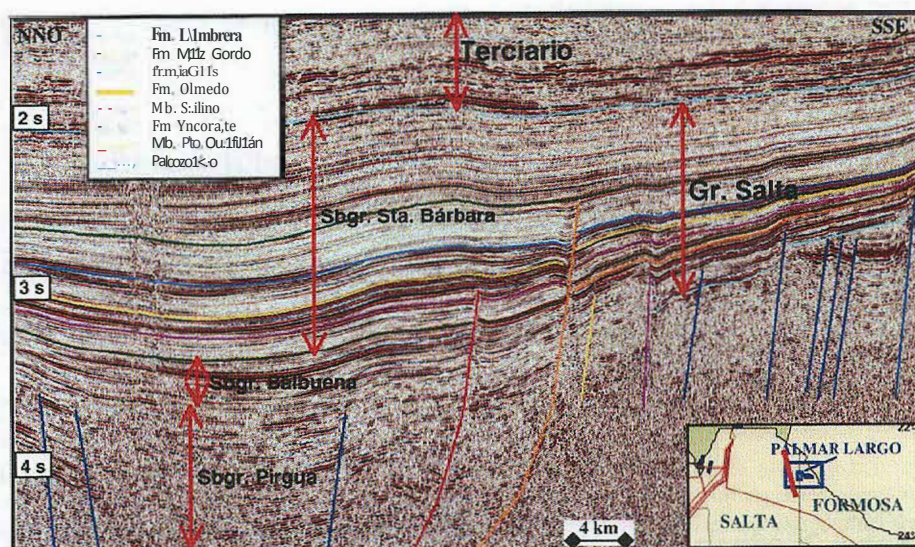


Figura 5 - Linha sísmica regional. Sub-bacia Lomas de Olmedo, Flanco Sul (Disalvo, 2005).

### 3.1.1 Subgrupo Pirgua

Gómez Omil *et al.* (1989) diferenciou o Subgrupo Pirgua em unidades tectonossedimentares ("UTS"). Com base no contexto e arranjo de fácies de semidetalhe diferenciou duas "UTS" principais: Unidade Tectonossedimentar I e Unidade Tectonossedimentar II.

A primeira constituída pelas formações La Yesera, El Cadillal e Las Curtiembres, corresponde a fácies de leque aluvial da margem ativa do rifle, lateralmente interdigitadas com fácies fluvial, eólica e de praia distal na parte central da bacia. A segunda tectonossequência compreende a Formação Los Blanquitos, tem fácies sedimentares semelhantes, porém de mais baixa energia e depósitos de granulação

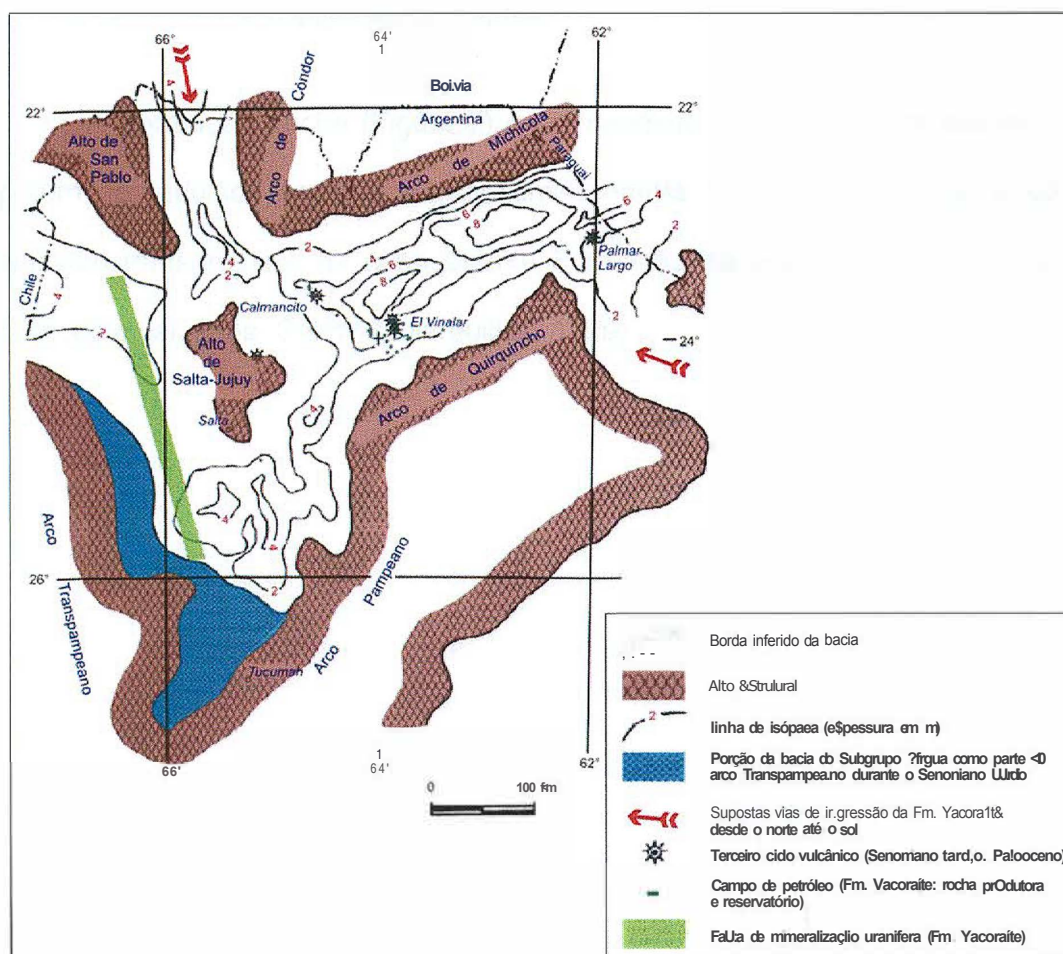
finas que se acumularam sobre um relevo mais discreto devido ao preenchimento da bacia e a menor atividade tectônica (Cominguez & Ramos, 1995).

### 3.1.2 Subgrupo Balbuena

A distensão que se manteve ativa durante os depósitos sinrifte, decresceu de forma abrupta a partir do Maastrichtiano, gerando a desaceleração da subsidência da bacia e conseqüentemente, uma diminuição do aporte sedimentar (Salfity & Marquillas, 1999; dei Papa & Salfity, 1999).

As sub-bacias, colmatadas pelos sedimentos da fase sinrifte (Subgrupo Pirgua), e os altos estruturais que as delimitam, foram recobertos pelos depósitos transgressivos basais pertencentes ao Subgrupo Balbuena (Figura 6), composto pelas Formações Lecho, Yacoraite e Olmedo (Salfity & Marquillas, 1994; dei Papa & Salfity, 1999). Esses sedimentos se depositaram no início do estágio pós-rifte, em uma recém estabelecida bacia interior, em fase de subsidência termal *Unierior sag basin* - Harding, 1984).

A mudança de estágio sinrifte para pós-rifte é evidenciada por uma ampla e bem definida superfície de inundação (dei Papa & Salfity, 1999).



**Figura 6 - Subgrupo Balbuena: seqüência sedimentar pós-riete (Formações Lecho, Yacoraite e Olmedo / El Tuna!, e Membro Salino). Modificada de Salfity & Marquillas (1999).**

Segundo Gómez Omil & Boll (1999), a Formação Lecho é compreendida como as litofácies elásticas continentais, depositadas em ambiente subaéreos, fluviais e eólicos. Enquanto que, a Formação Yacoraite é definida como as litofácies carbonáticas e elásticas de ambiente subaquático superficial, provavelmente marinho restrito a lacustre. Há grande interdigitação de fácies entre ambas as formações.



### 3.1.2.1 Formação Lecho

A Formação Lecho (Figura 7) é um depósito tabular de vasta distribuição areal, porém de reduzida espessura (aproximadamente 150 m), que marca o começo do episódio transgressivo da suprajacente Formação Yacoraite. É composto de arenitos brancos e calcários (Salfity & Marquillas, 1999).

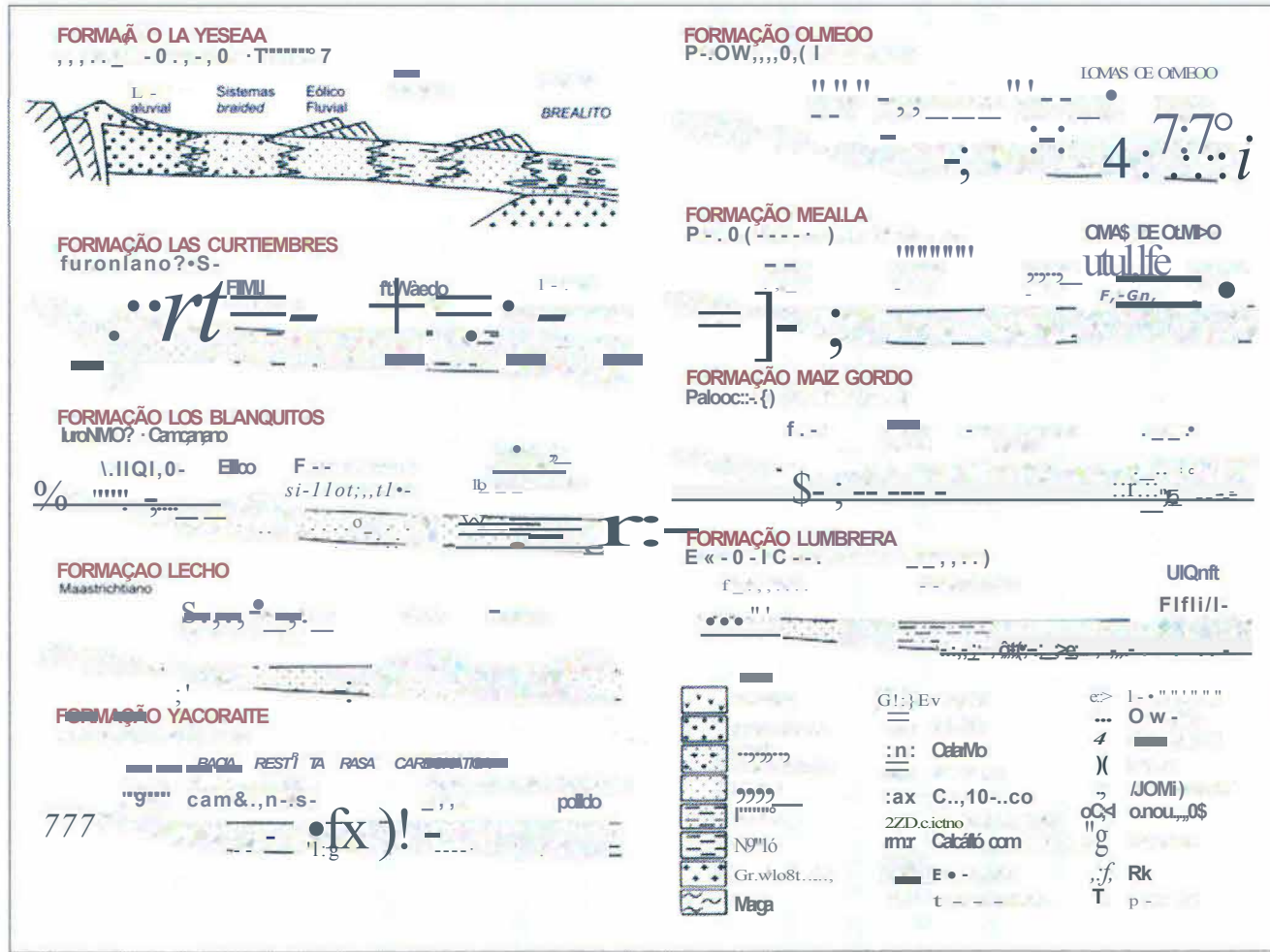


Figura 7 - Evolução palco-ambiental das formações do Grupo Salta. Modificada Salfity & Marquillas (1999).

A deposição da Formação Lecho foi controlada essencialmente por processos fluviais, eólicos e de interdunas. Entretanto, localmente contêm calcários, icnofósseis de dinossauros e fósseis de aves (Salfity & Marquillas, 1999).

### 3.1.2.2 Formação Yacoraite

A Formação Yacoraite, unidade estratigraficamente intermediária do Subgrupo Balbuena, foi a que alcançou a maior distribuição geográfica, chegando a encobrir os arcos de Condor, Michicola e Quirquincho, e os altos de San Pablo e de Salta-Jujuy, onde se depositou diretamente sobre o embasamento de idade pré-cambriano e paleozóico. A maior espessura conhecida não supera os 300 m, enquanto que no depocentro de Alemania mede aproximadamente 185 m (Salfity & Marquillas, 1999).

Essa unidade é um depósito tabular composto de carbonatos parcialmente dolomíticos, pelitos, arenitos, e menor volume vulcânicas. Além disso, contém diversos tipos de calcários e calcários estromatolíticos, que apresentam marcas de ondas, correntes e exposição subaérea (Salfity & Marquillas, 1999).

Segundo Gómez Omil & Boll (1999), são distinguíveis cinco unidades elásticas / carbonáticas, a saber da base para o topo:

1. Arenitos carbonáticos, de espessura delgada à ausente, e com contato basal brusco, ondulado a erosivo, e topo transicional. Interpretada como produto de inundação.

2. Carbonatos e lamas carbonáticas escuras, de variada composição (*grainstone* oolítico e fossilífero a *mudstone*}, que constituem a parte mais espessa da sucessão. Nesse nível destaca-se a presença de lamas carbonáticas, de coloração cinza esverdeada a cinza escura, com intercalações de níveis muito finos a grossos de matéria orgânica de conteúdo variável. A concentração de matéria orgânica, de origem algálica e bacteriana foi favorecida por sua mínima diluição ou dispersão por outros sedimentos, em virtude das condições de bacia faminta, e a sua preservação foi pouco afetada pelas variações da lamina de água.

3. *Grainstone* / *packstone* oolítico, de granulometria grossa, dispostos em bancos tabulares, com estrutura entrecruzada associado a associados estromatólitos (*boudstone* criptoalgálicos colunares e laminados).

4. Brechas litoclásticas planares, associadas a gretas de dessecação e intensa bioturbação em níveis pelíticos e de calcários micríticos laminados.

5. O nível pelítico caracteriza-se pelo predomínio de fácies argilosas, maciças, de coloração cinza esverdeado a avermelhado, com freqüentes gretas de dessecação correspondentes a condições com maior influência subaérea.

O conteúdo fossilífero da Formação Yacoraite é amplo, variando de fósseis de vertebrados, tais como, peixes e répteis, invertebrados, tais como, gastrópodes, ostracodes, pelecípodes e escassos miliólídeos. Além disso, contêm palinomorfos,

carófitas e outras algas, restos de vegetais fossilizados e icnofósseis de pegadas de dinossauros e de aves (Salfity & Marquillas, 1999).

A Formação Yacoraite é o principal horizonte produtor de hidrocarbonetos da Bacia de Salta. Ela se comporta como rocha geradora, como rocha reservatório (arenitos porosos, calcários fissurados e oolíticos) e, também, como rocha selante (argilitos e carbonatos impermeáveis). A maioria das jazidas descobertas localiza-se na região nordestes da bacia (Figura 6), cujas trapas são do tipo estratigráfico - estrutural, e onde os poços chegam alcançar profundidades de 3000 a 4000 m. No entanto, na sub-bacia de Metán se explora em estruturas onde a Formação Yacoraite se encontra em baixa profundidade (Salfity & Marquillas, 1999).

### 3.1.2.3 Formação Olmedo

A Formação Olmedo (Figura 8) é constituída principalmente por evaporitos (halita, anidrita e gesso), dolomicritos, micritos negros, folhelhos negros, verdes e roxos e arenitos (Gómez Omil *et al.*, 1989; Salfity & Marquillas, 1999). Em alguns setores localizados da bacia encontram-se eventos vulcânicos (Gómez Omil *et al.*, 1989). Os evaporitos, na região oriental da bacia, constituem uma notável unidade em subsuperfície, denominada Membro Salino. Nessa região da bacia o Membro Salino pode alcançar espessuras de cerca de 900 m (Salfity & Marquillas, 1999).

A Formação Olmedo (Figura 8) foi gerada em um sistema siliciclástico - evaporítico, composto por um lago hipersalino, restrito ao depocentro de Lomas de

Olmedo, rodeado por extensas planícies pantanosas salinas e planícies de areias trazidas das bordas pelo aporte sedimentar (Gómez Omil *et al.*, 1989; Gómez Omil & Boll, 1999; Salfity & Marquillas, 1999).

A mecânica de circulação propiciou a criação de condições anóxicas quase permanentes do sistema. Palinomorfos de ambientes lacustres e pantanosos corroboram com essa interpretação paleoambiental (Salfity & Marquillas, 1999).

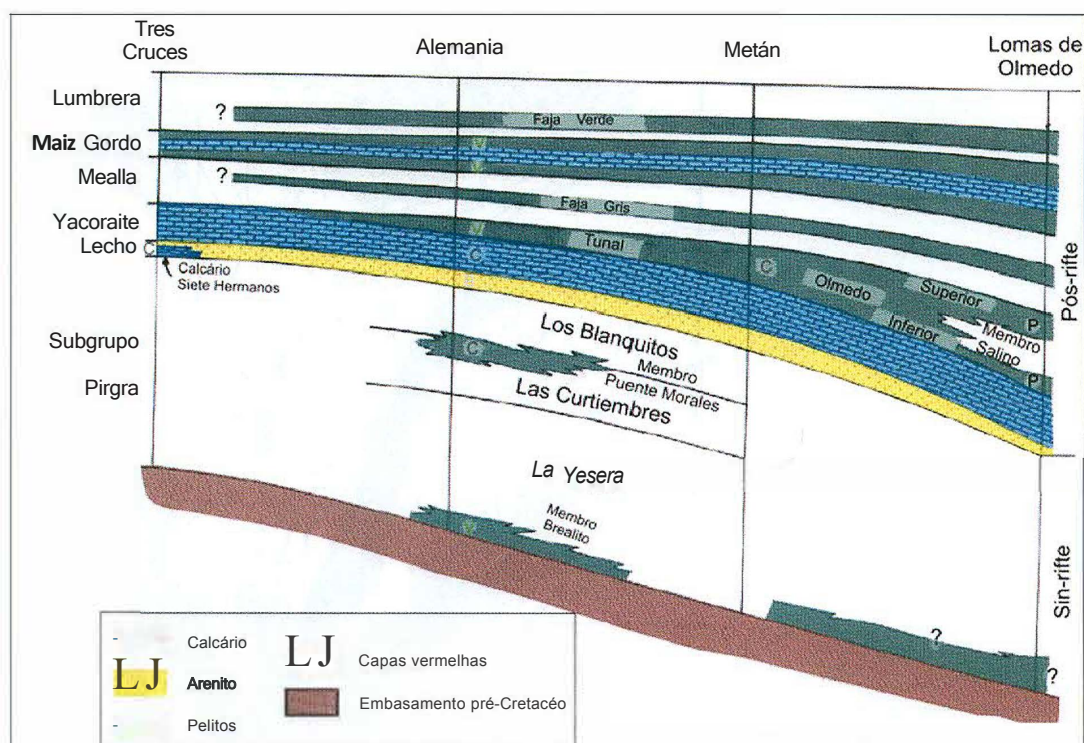


Figura 8 - Esquema (sem escala) dos principais eventos de inundação durante a deposição do Grupo Salta. Modificada de Salfity & Marquillas (1999).

### 3.1.3 Subgrupo Santa Bárbara

A deposição das rochas sedimentares que compõem o subgrupo Santa Bárbara (Figura 9), ocorreu no final do estágio pós-rifte, sobre os depósitos do Subgrupo Balbuena, em uma extensa bacia sag (Harding, 1984).

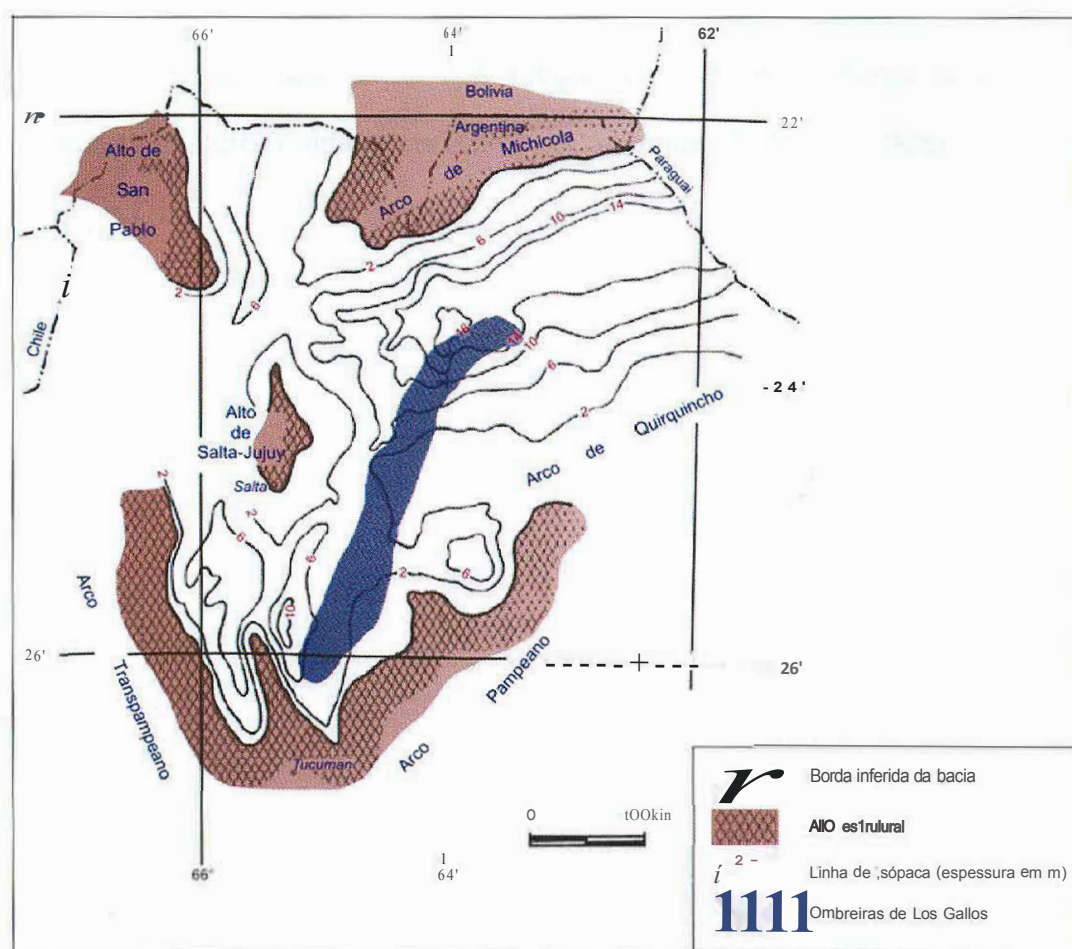


Figura 9 - Subgrupo Santa Bárbara: finalização da sedimentação pós-rifte (Formações Mealla, Maíz Gordo e Lumbreira). Modificada de Salfity & Marquillas (1999).

Em âmbito regional, as três formações que compõem o Subgrupo Santa Bárbara – Formações Mealla, Maíz Gordo e Lumbrera - apresentam semelhanças paleoambientais e mesmos padrões de distribuição de fácies, que indicam a evolução de uma bacia restrita (de la Papa & Salfity, 1999). Folhelhos, margas, e escassos carbonatos foram depositados em uma suíte de lagos efêmeros, com inundações e aporte sedimentar variáveis, alternados com depósitos fluviais (Comínguez & Ramos, 1995).

A sucessão sedimentar dos subgrupos Balbuena e Santa Bárbara apresenta espessura de aproximadamente 2200 m (Comínguez & Ramos, 1995).



## **3.2 Arcabouço estrutural e evolução tectônica**

### **3.2.1 Introdução**

A Bacia de Salta está dentro de um sistema de rifle (denominado Sistema de Rifle Salta) que compreende uma complexa suíte de sub-bacias distensionais intracratônicas com vulcanismo associado (Gómez Omil & Boll, 2005; Comínguez & Ramos, 1995). O início de sua sedimentação ocorreu primeiramente de modo isolado nas diferentes sub-bacias e, logo após, de modo intercomunicado, se desenvolvendo ao longo de um ambiente de retroarco que envolveu os territórios do noroeste da Argentina, Bolívia, Paraguai e, provavelmente, Chile (Gómez Omil & Boll, 2005; Salfity & Marquillas, 1999). Este sistema implantou-se sobre uma bacia presente no intervalo desde o Pré-Cambriano até o Carbonífero, e que se encontra deformada em algumas regiões por efeitos compressivos anteriores ao Cretáceo (Gómez Omil & Boll, 2005). A porção oeste do sistema foi posteriormente invertida pela deformação andina (Terciário superior) e tem sido, desde então, envolvida em complexas dobras e cinturões de cavalgamento (Comínguez & Ramos, 1995).

Para Comínguez & Ramos (1995) e Milani & Thomaz Filho (2000) o posicionamento do Sistema de Rifle Salta foi controlado por estruturas tectônicas do Pré-Cambriano superior / Cambriano, as quais estão expressas nos vários crátons pré-cambrianos que foram amalgamados durante a Orogenia Pampeana no Cambriano inferior.

Os diferentes braços do sistema se dispõem segundo três direções estruturais principais: norte-sul, nordeste-sudoeste e noroeste-sudeste (Salfity & Marquillas, 1999).

### **3.2.2 Arcabouço Estrutural**

#### **3.2.2.1 Estrutura original do Sistema de Rifte Salta**

A estrutura original do Sistema de Rifte Salta foi descrita por Comínguez & Ramos (1995) como sendo de difícil estabelecimento em função do substancial encurtamento crustal sofrido pela região na frente orogênica oeste. Para constituir a estrutura original, estes autores estudaram um ramo do rifte situado a leste da atual frente orogênica andina, o qual comporta a denominada Sub-bacia de Lamas de Olmedo.

Uma característica importante identificada na área da Sub-bacia de Lamas de Olmedo é a assimetria do sistema de rifte (Figura 10), a qual é evidenciada pelo grau de arqueamento exposto pelos depósitos pré-rifte, como também na distribuição e rejeitas verticais das falhas normais (Comínguez & Ramos, 1995).

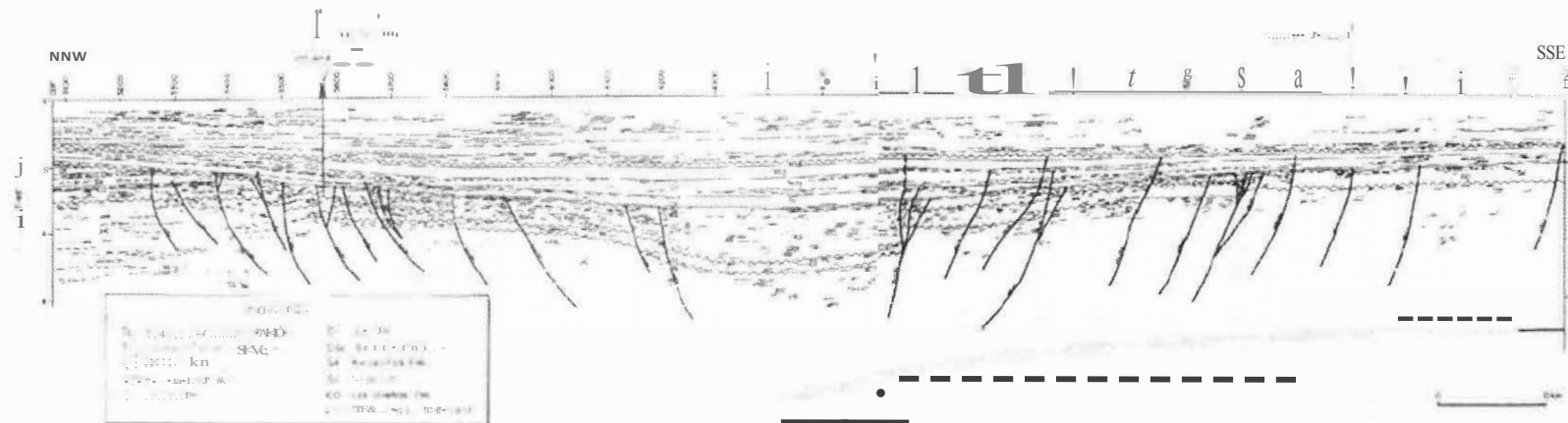


Figura 10 - Perfil geológico-estrutural da Sub-bacia de Lomas de Olmedo. Nota-se a assimetria do sistema de rifte. Fonte: Comingues e Ramos, 1995.

Na Figura 10 é possível observar o truncamento de certas unidades na margem norte da sub-bacia, o que pode ser interpretado como um maior arqueamento sofrido por estas unidades nesta porção. Já na porção sul, este truncamento não foi reconhecido, o que sugere que o arqueamento não existiu ou foi moderado neste setor. Segundo Comínguez & Ramos (1995) este arqueamento é reconhecido como o Arco Michicola. O *trend* oeste-noroeste do Arco é paralelo ao da sub-bacia e sua idade é mais antiga que os depósitos rifles. O arqueamento na margem norte da bacia estabelece a área de máximo soergimento térmico e os mais elevados gradientes térmicos antes do início do rifleamento (Figura 11). Comínguez & Ramos (1995) descrevem uma série de falhas normais EW bordejando os flancos da sub-bacia, sendo que as situadas no flanco norte tem maiores rejeitas. A maior parte destas falhas foram ativas até o topo do Subgrupo Pirgua, mas existem evidências de falhamentos no Subgrupo Balbuena que, ao serem analisadas em detalhe, demonstram associação com dobramentos menores. Estas dobras são interpretadas como estruturas geradas nos sítios de contração de falhas direcionais que aproveitaram planos de falhas normais prévios. As falhas transcorrentes apresentam, localmente, estruturas em flor positivas associadas e são relacionadas à interação entre a compressão andina e os *trends* de direção oeste-sudoeste oblíquos das estruturas rifle.

Ainda no trabalho de Comínguez & Ramos (1995), na área da sub-bacia de Lomas de Olmedo, foi mapeado nas porções sul de seções sísmicas um refletor sub-horizontal bastante sutil entre 7 e 8 segundos de tempo duplo de trânsito (cerca de 18-21 km de profundidade), o qual foi interpretado como o limite entre crosta superior e

crosta inferior. O topo desta zona refletiva mergulha  $3,5^\circ$  para norte, abaixo do depocentro, e o mesmo é caracterizado como paralelo à zona de descolamento que controla o sistema rifle. Os autores entendem que o truncamento dos estratos paleozóicos juntamente com a identificação dessa descontinuidade aos 7- 8s sugere que um nível de descolamento inclinado para o norte controlou a assimetria do rifle (Figura 11).

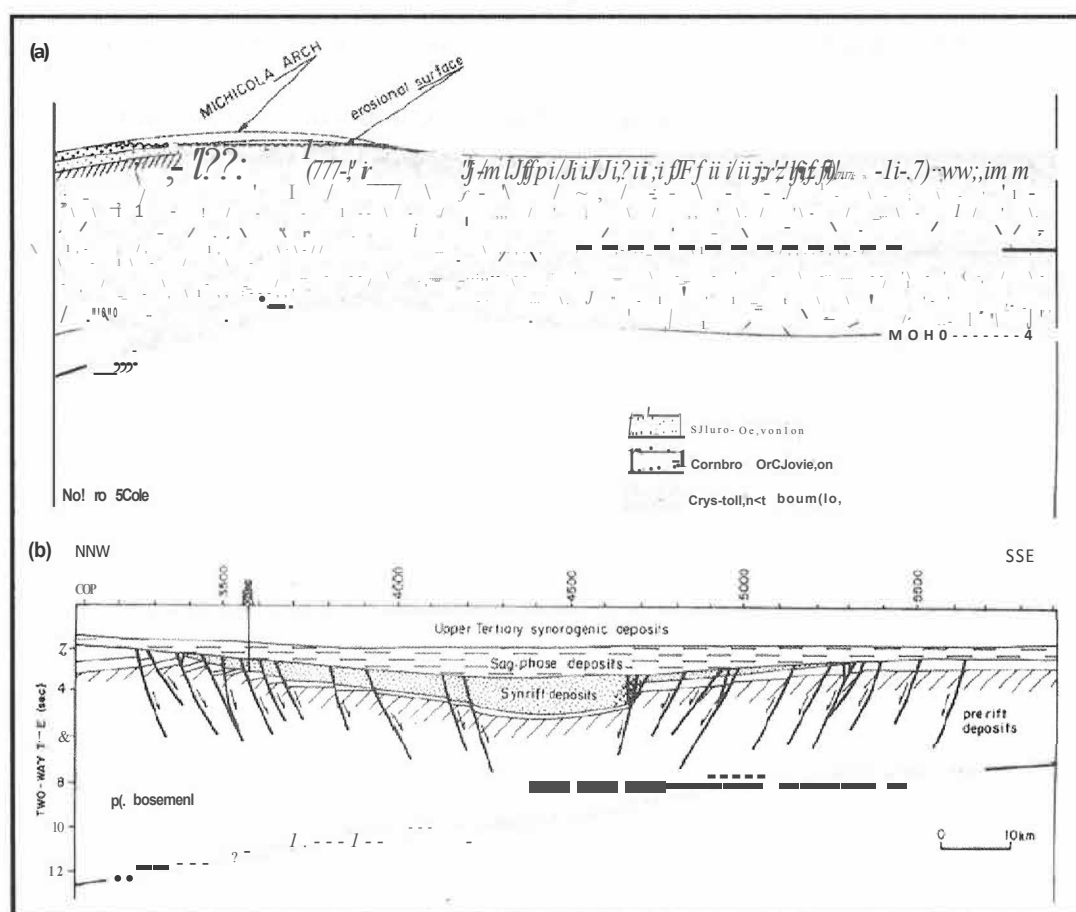


Figura 11 - Seção esquemática do rifte Lomas de Olmedo. (a) Reconstrução do entumescimento local pretérito à abertura do rifte; (b) Estrutura do rifte anterior a inversão tectônica andina (Comínguez & Ramos, 1995).

### 3.2.2.2 Regiões estruturais do Sistema Rife Salta

Após a soma de sucessivos eventos tectônicos, tanto cretáceos como terciários, a que o Sistema Rife Salta foi submetido, esta região pode ser dividida em 5 regiões estruturais diferentes entre si (Gómez Omil & Boll, 2005): (I) Sub-bacia de Lomas de Olmedo com deformação distensional dominante; (II) Sub-bacia de Lomas de Olmedo com inversão tectônica incipiente; (III) Sistema de Santa Bárbara; (IV) Frente subandina norte-ocidental; (V) Faixa dobrada interna (Figura 12).

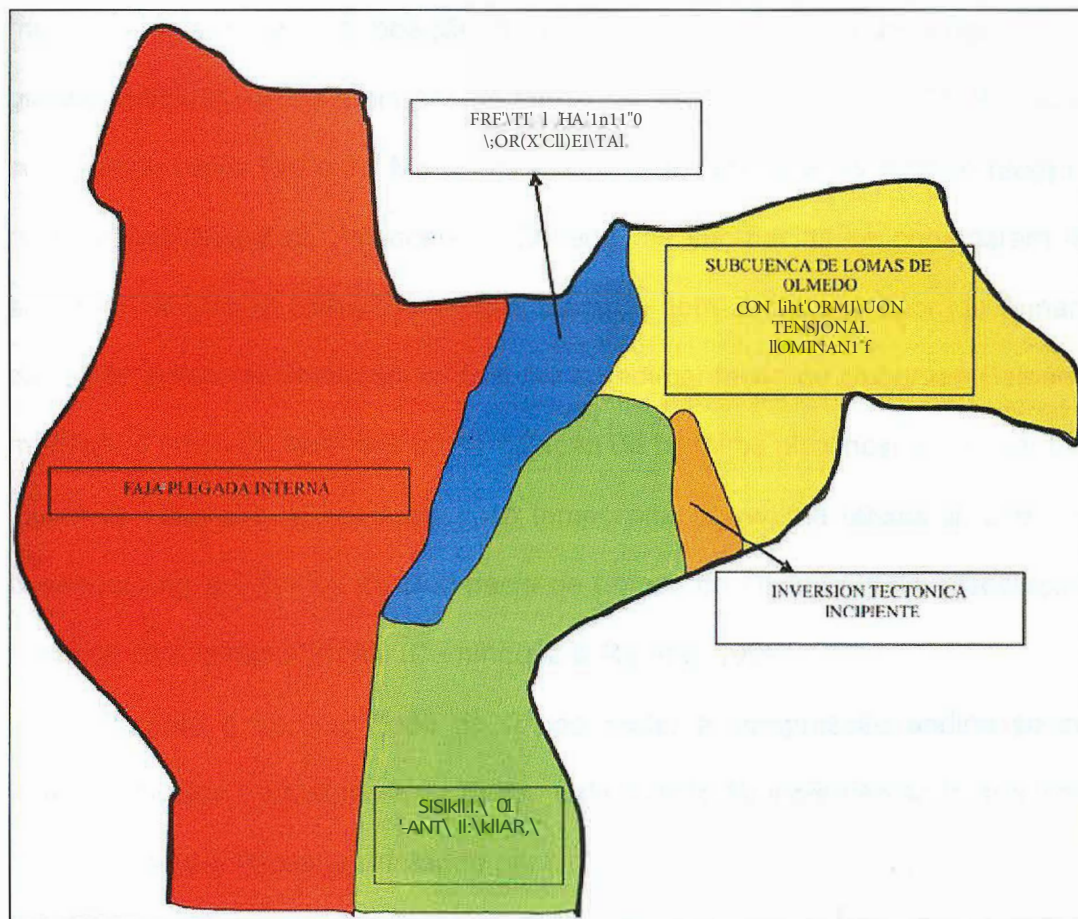


Figura 12 - Ambientes tectônicos da Bacia de Salta (Gómez Omil & Boll, 2005).

### 3.2.3 Evolução Tectônica

Como descrito anteriormente, a bacia de Salta é compreendida geneticamente e relacionada como uma bacia intracratônica distensional com vulcanismo associado. Os eventos distensionais que conduziram à sua formação, associados com vulcanismo básico, se desenvolveram principalmente nos estágios iniciais de abertura da bacia, de

modo contemporâneo à deposição do Subgrupo Pirgua, formando várias sub-bacias de grande subsidência, independentes entre si (Gómez Omil & Boll, 2005). Estas teriam se configurado entre 130 e 75 Ma e nos estágios de resfriamento térmico (sag) ocorridos no Cretáceo Superior, Paleoceno e Eoceno, as sub-bacias se conectaram, salvo no ambiente da Dorsal Salto-Jujefá, que coincide com uma zona dobrada remanescente da região deformada paleozóica. Embora a sedimentação do Subgrupo Balbuena tenha marcado o início da fase sag, a intercalação de basaltos alcalinos de Palmar Largo com calcários Yacoraite, indica reativação temporária do regime tensional, como pode ser observado na porção sul da Sub-bacia de Lomas de Olmedo, pela associação desses basaltos com falhas normais (Comínguez & Ramos, 1995).

Durante o Eoceno (topo do Grupo Salta) a compressão andina se iniciou de forma localizada no sudoeste da bacia. Este evento foi incrementando sua intensidade até o Mioceno e Plioceno, afetando principalmente as regiões localizadas a oeste, mais próximo a zona da colisão das placas Pacífica e Sulamericana (Gómez Omil & Boll, 2005). A área recebeu mais de 2.700 m de depósitos sin-orogênicos distais durante a deformação andina (Comínguez & Ramos, 1995). Para Comínguez & Ramos (1995) o estudo de dados sísmicos mostra que a região do Sistema Rife Salta foi submetida à distensão durante a maior parte do Cretáceo e Terciário inferior e que, este sistema ao ser comparado com sistemas rifles vizinhos, pode ter sido unido no tempo e no espaço ao regime distensional responsável pela abertura do Oceano Atlântico Sul. Estes autores revelam que até esta região, extremo oeste dos sistemas rifles ligados à abertura do Oceano Atlântico Sul, houve uma diminuição do estiramento distensional. Esta diminuição é inferida pela redução do fator de estiramento de leste para oeste, pela composição química das lavas basálticas (basaltos toleíticos na Bacia do Paraná e



basaltos alcalinos na Bacia de Salta), e pelo volume relativo dos basaltos, com um mínimo no rifle Salta.

A Bacia de Salta foi submetida a soerguimento e erosão por pelo menos três momentos após seu preenchimento total: (I) Eoceno tardio-Oligoceno inferior (fase Incaica), (II) Mioceno tardio (segundo pulso da fase Quechua) e (III) Pleistoceno (fase Diaguita) (Salfity & Marquillas, 1999).

### 3.3 Contexto geológico histórico

A Bacia de Salta está situada no limite leste do Domínio Andino da América do Sul, localizado na porção oeste da Placa Sul-Americana (Milani & Thomaz Filho, 2000; Figura 13).

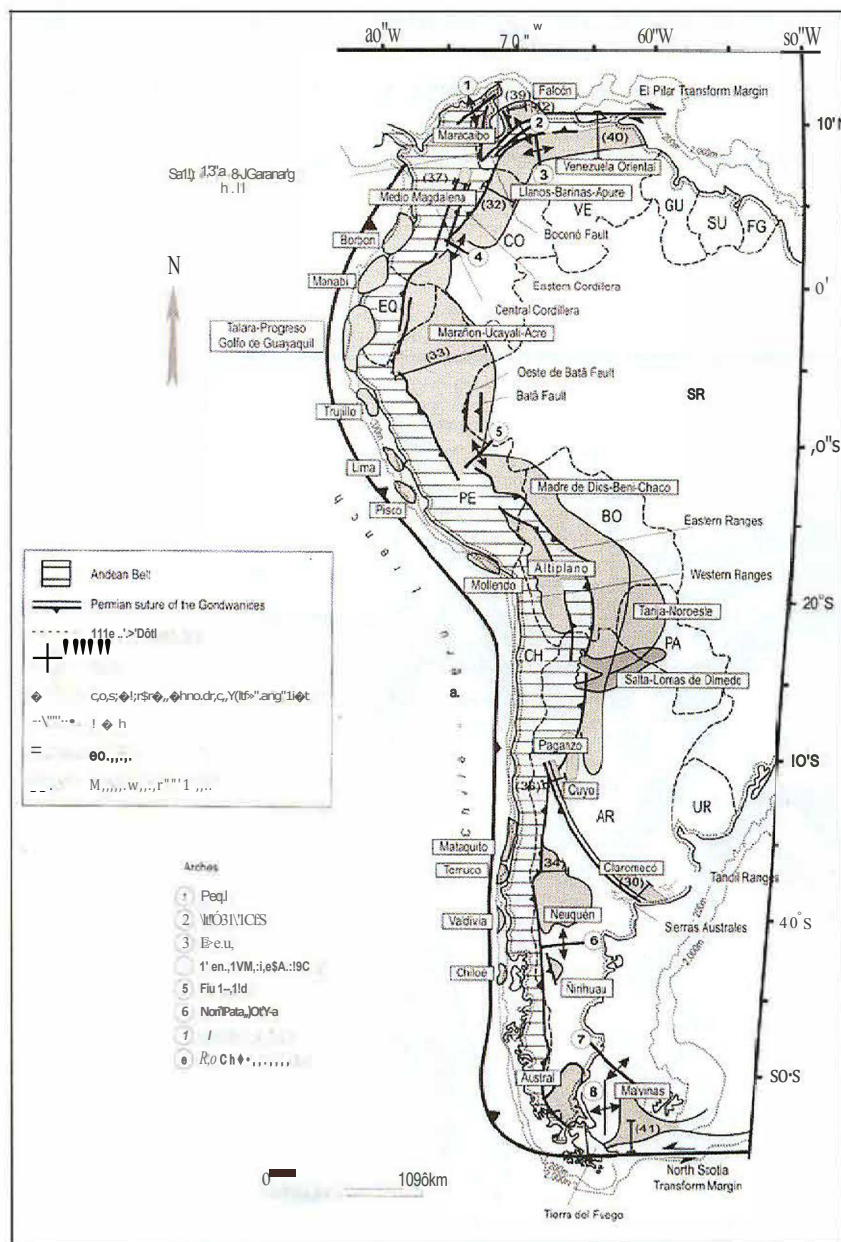


Figura 13 - Margem convergente andina e margens transforme norte e sul (Milani & Thomaz Filho, 2000).

Este domínio é caracterizado como uma margem convergente de placa, ao longo da qual foi criado o cinturão orogênico dos Andes pelo encontro da crosta continental da América do Sul com a crosta oceânica sob o Oceano Pacífico. Dentro do Domínio

Andino da América do Sul, esta bacia enquadra-se no segmento dos Andes Centrais do noroeste argentino, tendo se desenvolvido ao sul dos arcos de Michicola e San Pablo e ao norte dos arcos Pampeanos e Traspampeano (Salfity & Marquillas, 1999;) (Figura 14).

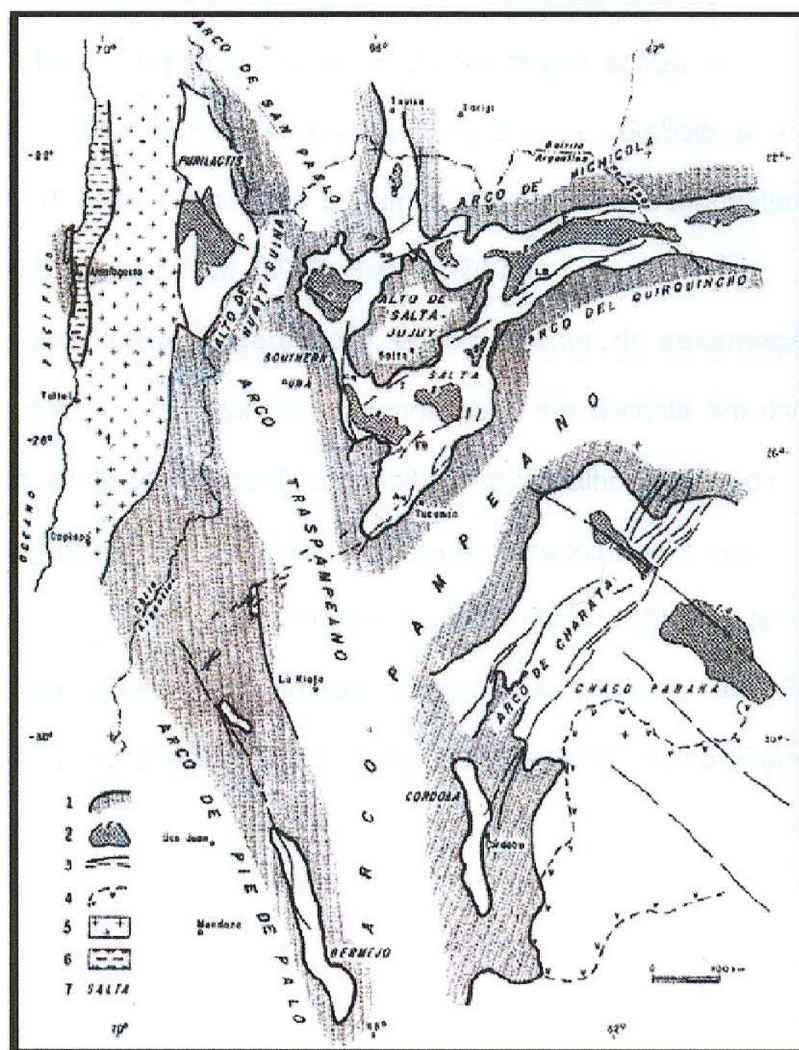


Figura 14 - Esquema tectônico da Bacia de Salta e regiões adjacentes em tempos pré-Maastrichtianos. (1) Borda da bacia; (2) Depocentro cretáceo não marinho; (3) Falhas e lineamentos atuais; (4) Distribuição do magmatismo Serra Geral (Jurássico superior- Neocomiano); (5) Arco magmático cretáceo-eoceno; (6) Bacia marinha de la costa (Tithoniano- Neocomiano); (7) Nome da bacia. Lineamentos: T - Tomasito, LB - Los

Blancos, SG - Salinas Grandes, Co - Cobres, C - Calama, O - Olapacato, Cq - Calchaquí, I - Isonza, EB - El Brete, Aq - Aconquija. Fonte: Salfity & Marquillas, 1999.

O noroeste da Argentina possui uma geologia bastante diversificada, constituída por rochas do embasamento de idades meso/neoproterozóica a paleozóica, sucedidas por associações plutono-vulcanossedimentares Jurássico Superior? / Cretáceo Inferior a Paleoceno inferior. A porção ocidental dessa região sofreu processo de inversão durante a deformação compressiva andina no Eoceno (Galliski & Viramente, 1988; Gómez Omil *et ai.* 1989; Cominguez & Ramos, 1995; Salfity & Marquillas, 1999; Gómez Omil & Boll, 1999; Disalvo *et ai.*, 2005; Sabino, 2004).

A história evolutiva de geração e, principalmente, de deformação das diversas unidades presentes neste setor da Argentina pode ser dividida em diversos ciclos de deformação, os quais se apresentam descritos no trabalho de Ramos (1999), que traz uma síntese das propostas contando com maior consenso para evolução estrutural do território argentino. Sete ciclos orogênicos são caracterizados, tendo cinco deles registros de ocorrência no setor noroeste da Argentina, são eles: Ciclo Pampeano, Ciclo Famatiniano, Ciclo Gonduânico, Ciclo Patagônico e Ciclo Andino (Figura 15).

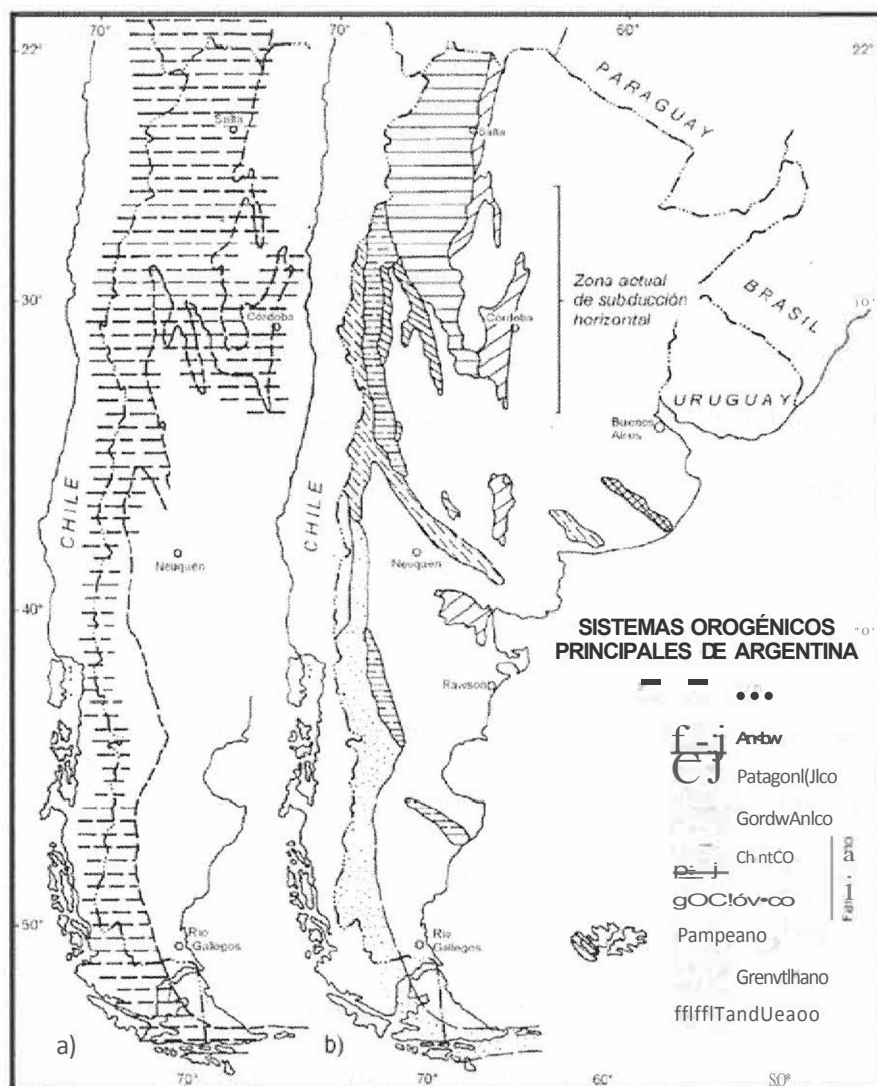


Figura 15 - Principais sistemas orogénicos desenvolvidos na Argentina: a) Área abrangida pela orogenia andina; b) Principais registros das orogenias pré-andinas (Ramos, 1999).

### 3.4 Geologia do petróleo

#### 3.4.1 Sistema petrolífero

Os sistemas petrolíferos da bacia cretácea do noroeste argentino são conhecidos como Yacoraite-Yacoraite (!) e Yacoraite-Palmar Largo (!) (Magoon & Dow - 1994 *apud* Gómez Omil & Boll 1999). Os elementos e processos destes sistemas são semelhantes nos três principais depocentros: Metán, Tres Cruces e Lomas de Olmedo onde, neste último, há maior soterramento o que provoca uma geração mais recente e efetiva.

#### 3.4.2 Rocha geradora

A sub-bacia Lomas de Olmedo apresenta maior potencial de geração de hidrocarbonetos, pois possui significativos intervalos de rochas geradoras da Formação Yacoraite e, principalmente, porque a partir do Mioceno esta região funcionou como uma bacia *foreland* associada à orogênese dos Andes. Neste contexto, enquanto o restante da bacia passava por um processo de soerguimento e exumação, a sub-bacia Lomas de Olmedo sofreu soterramento e subsidência dos intervalos potenciais geradores a profundidades em janela de geração superiores a 3 000 m.

Análises geoquímicas feitas nos campos produtores de Puesto Guardián, Cuchuma, Lumbrera e Caimancito permitem identificar a provável rocha geradora dos hidrocarbonetos, uma vez que a matéria orgânica coincide com o intervalo previamente tido como potencial gerador da Formação Yacoraite, o Membro Superior ou Las Avispas.

Os querogênios encontrados são do tipo I e li (Figura 16) e, de acordo com estudos regionais efetuados em amostras de poços no intervalo gerador (Core

Laboratories & Exploration Logging, 1992 *apud* Gómez Omil & Boll, 1999), o conteúdo de carbono orgânico total (COT) aproxima-se de 2%, podendo-se encontrar até 3% em poucos casos, mas, em cerca das 80% das amostras, o índice de COT não supera 0,5% (Figura 17), o que explicaria a carência de grandes campos produtores na bacia face às boas estruturas potencialmente trapeadoras sem indícios de óleos ou gás.

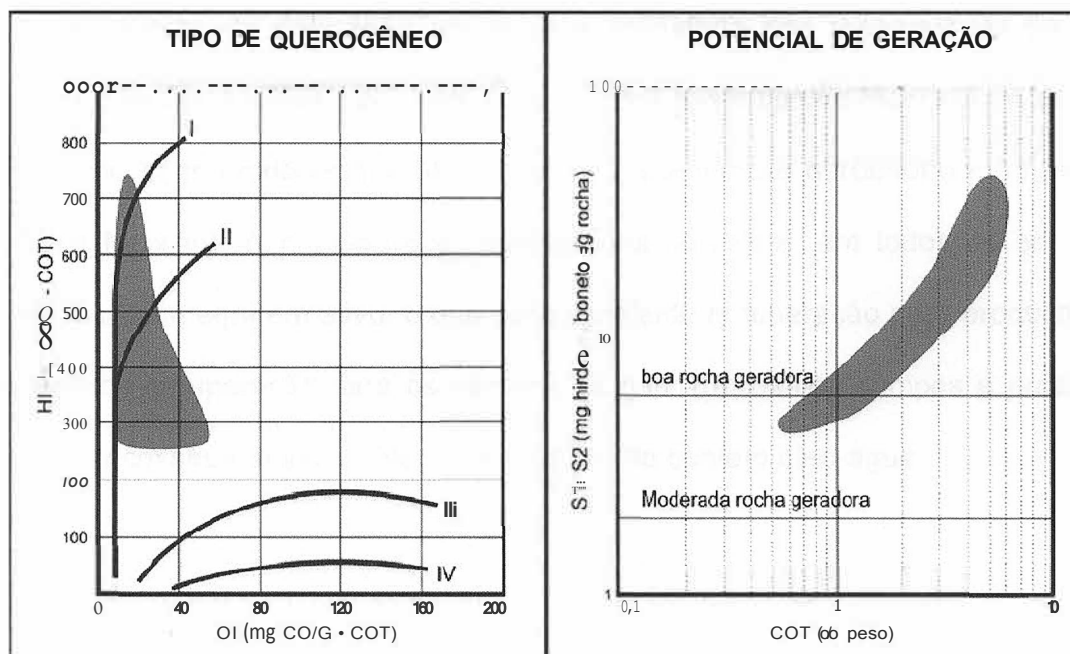


Figura 16 - Tipo de querogênio da Formação Yacoraite e potencial de geração de hidrocarbonetos (Gómez Omil & Boll, 1999).

Os petróleos encontrados são predominantemente do tipo saturado com pouca participação de aromáticos com densidade variando de 43° API em Palmar Largo, 40° API em Caimancito e 39° API em Puesto Guardián, enquanto no campo Martínez dei Tineo chega a 14° API devido à alta biodegradação.

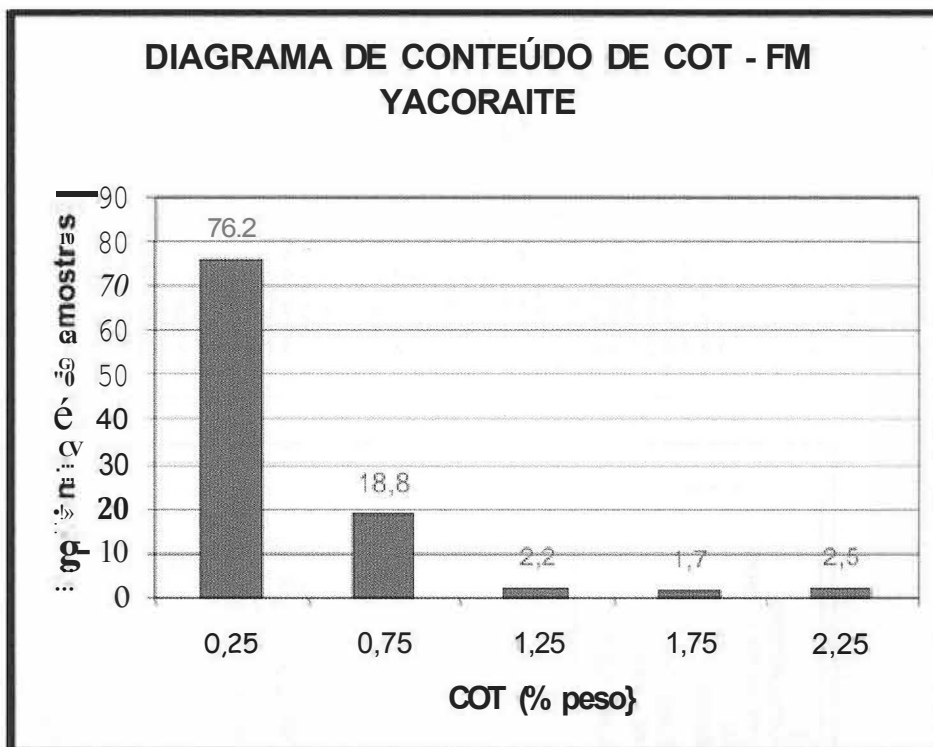


Figura 17 - Diagrama de número de amostras pelo conteúdo de COT na Formação Yacoraite. Nota-se o predomínio de amostras com baixa percentagem de COT (Gómez Omil & Boll, 1999).

### 3.4.3 Rochas reservatório

#### 3.4.3.1 Reservatórios da formação Yacoraite

Os principais reservatórios produtivos em ordem de importância são as rochas carbonáticas fraturadas, rochas vulcânicas e piroclásticas e os arenitos eólicos. Em todos os três casos os reservatórios mencionados estão localizados na sub-bacia de Lomas de Olmedo (Figura 18).





### 3.4.3.2 Reservatórios fraturados

Este tipo de reservatório é o mais comum na Formação Yacoraite e tem como constituintes litológicos os espessos bancos carbonáticos, com poucos representantes de rochas siliciclásticas, sendo que a acumulação está concentrada nas fissuras e fraturas da rocha, com alguma contribuição do espaço de poros. O processo de fraturamento se dá normalmente no eixo e flancos dos grandes anticlinais gerados pela inversão tectônica localizada a oeste da bacia e, conforme descrito anteriormente, localizam-se principalmente nos domínios tectônicos do Sistema de Santa Bárbara e da Sub-bacia de Lamas de Olmedo com Deformação Tensional, com poucas ocorrências na Frente Subandina Norocidental e de Inversão Tectônica Incipiente (Figura 19).

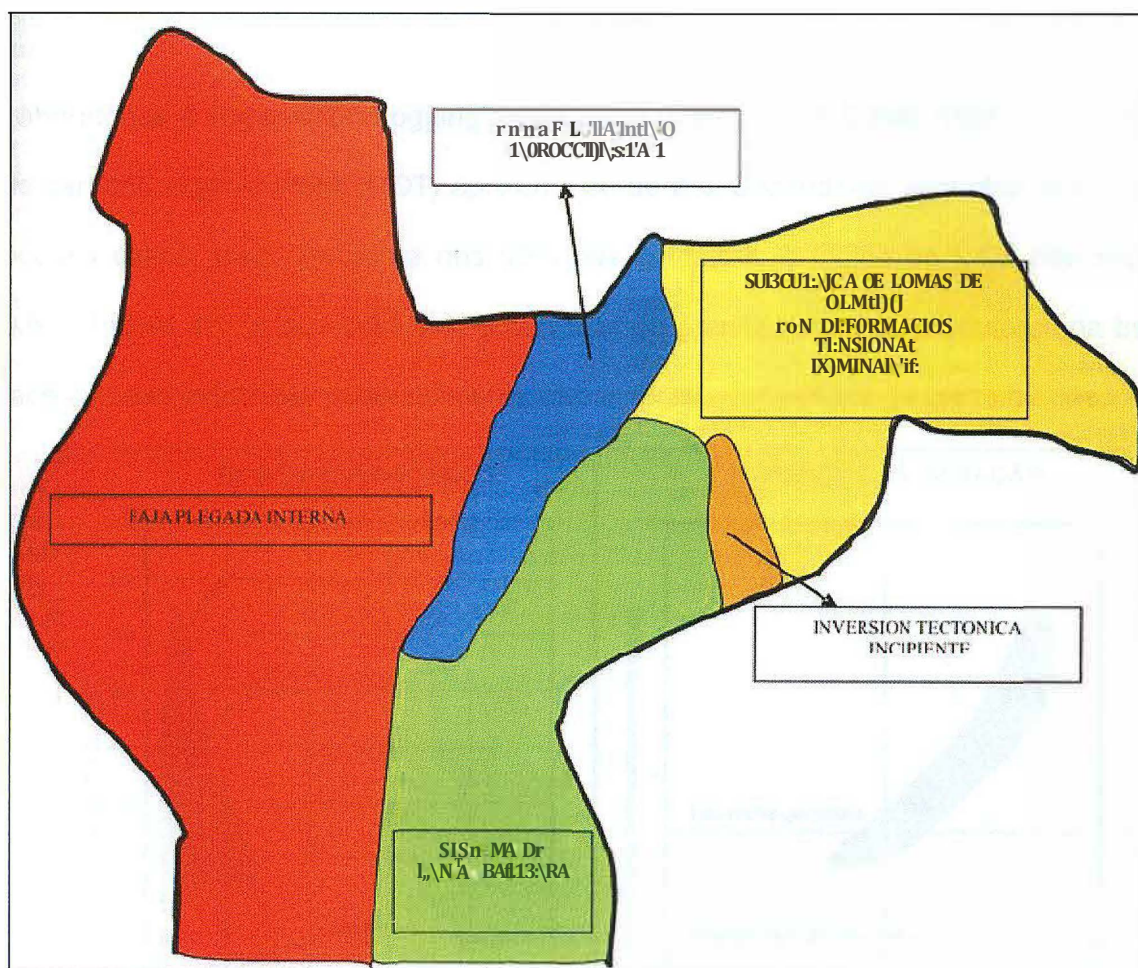


Figura 19 - Ambientes tectônicos da Bacia de Salta (Gómez Omil & Boll, 2005).

O valor médio de porosidade dos reservatórios fraturados da Formação Yacoraite é de 5,5%, contudo há uma variação que vai de 3% a 10%, sendo que, em alguns casos, boa parte da porosidade é oriunda da porosidade primária da rocha. Os níveis de reservatórios porosos primários apresentam valores de porosidade superior aos dos reservatórios fraturados; no entanto as espessuras dos níveis porosos primários é irrisória quando comparadas às dos níveis fraturados. Além disso, os valores de saturação em água e salinidade dos reservatórios porosos primários são desfavoráveis por isso as produções neste tipo de reservatório sempre foram muito boas (maiores que 6000 boe/d em Caimancito e 1000000 m<sup>3</sup>/d de gás em Valle Morado). A pressão dos reservatórios se refere, em todos os casos, à presença de um aquífero ativo, o que gera excelente recuperação para produção de óleo e fraca recuperação para os campos de gás. Em muitos campos a produção precisa ser cessada devido à elevação do nível do contato óleo-água.

### 3.4.3.3 Campo de Caimancito

Este campo, descoberto no ano de 1968, trata-se do principal campo de produção em reservatórios fraturados. Inicialmente a produção provinda da Formação Yacoraite foi superior a 800 m<sup>3</sup>/d, porém com a exploração deste intervalo partiu-se para as margas verdes da Formação Maíz Gordo e na Formação Lumbrera, contudo a produção na Formação Yacoraite foi de 9,9 Mm<sup>3</sup> correspondente a 90% do total.

Foram perfurados 53 poços que alcançaram reservatórios com 200 m de espessura em profundidade média de 3 700 m posicionados em uma estrutura anticlinal de grande dimensão formada por inversão tectônica (Disalvo *et al.*, 2005).

Um importante conjunto de falhas foi responsável pela formação da trapa (anticlinal associada à falha de empurrão) além de funcionar como rota de migração de hidrocarbonetos a partir da rocha geradora não só para os reservatórios da Formação Yacoraite como também para os intervalos superiores das formações Maíz Gordo e Lumbrera (Disalvo *et al.*, 2002a).

A porosidade média da Formação Yacoraite no campo é de 5,2% e a permeabilidade é de 50,6 mD. Uma das principais características do reservatório é a entrada de água que, apesar de diminuir a razão de produção óleo-água, contribui para manter a pressão de 484 kg/cm<sup>2</sup> em condições de temperatura de 150° C. O óleo tem 42° API e tem um fator de volume de 2,3 o que possibilita recuperar cerca de 50% do petróleo acumulado. Segundo Disalvo *et al.* (2002a) atualmente existem sete poços produzindo um total de 69 m<sup>3</sup>/d.

#### 3.4.3.4 Reservatórios não fraturados

Este tipo de reservatório resume-se a litotipos com porosidade e permeabilidade primárias, modificada por diagênese e compostos por rochas elásticas ou carbonáticas.

Apesar do grande número de campos produtores neste tipo de reservatório da Formação Yacoraite, o volume de hidrocarbonetos produzidos é pequeno.

#### 3.4.3.5 Reservatórios elásticos

Os mais representativos campos produtores em reservatórios elásticos encontram-se no sudeste da Província de Salta no denominado "Flanco Sul" da sub-bacia de Lamas de Olmedo, cujo intervalo mais importante é designado Arena 6. Posicionado na base do Membro Las Avispas, constitui um arenito de distribuição irregular, geometria lenticular que alcança 15 m de espessura. Na descrição feita por Disalvo *et al.* (2002a) são apresentados dois tipos básicos de arenitos:

1) La Arena 6A: arenitos quartzosos de cor branca, granulação fina a média, com estratificação cruzada planar e laminação gradada e moderada bioturbação, cujo ambiente deposicional é interpretado como eólico. Tem características petrofísicas variáveis, oscilando de 10% a 20 % de porosidade. Os principais campos produtores neste intervalo são Puesto Guardián, El Vinalar Norte, Climaco, Pozo Escondido, Canada Grande, La Bolsa e Yacarecito;

2) La Arena 6B: posicionados sempre acima da La Arena 6A, é de cor amarelada, granulação fina a média, com partículas quartzosas e carbonáticas como oólitos e bioclastos cimentadas por calcário. As principais estruturas são estratificação cruzada tabular de pequeno e médio porte, marcas de ondas e importante bioturbação o que levou a interpretação de um ambiente deposicional de barras produto de ondas o qual retrabalhou e redepositou fácies originalmente eólicas (Gómez Omil & Boll, 1999). Petrofísicamente difere-se da La Arena 6A por ter porosidade inferior de 7%. Os principais campos produtores são Canada Grande e Dos Puntitas.

Em vários setores da bacia ocorrem corpos arenosos similares a La Arena 6B, porém com espessuras inferiores a três metros, o que os torna irrelevantes para produção econômica de hidrocarbonetos.

### 3.4.3.6 Reservatórios carbonáticos

Com exceção de poucos poços no campo de Puesto Guardián, fácies carbonáticas da Formação Yacoraite sem fraturas não têm produzido quantidades importantes de hidrocarbonetos. Apesar de sua grande extensão areal e uniformidade dos litotipos, as propriedades petrográficas são muito variáveis evidenciando a forte atuação diagenética que modifica as propriedades originais das rochas.

Tanto a porosidade primária quanto secundária são reconhecidos tendo os melhores valores observados em rochas de textura grão suportada e os *boundstones* que apresentam até 10% a 25% de porosidade, porém a conectividade do sistema é baixa.



### 3.4.3.7 Campos do Flanco Sul

O Flanco Sul da sub-bacia Lomas de Olmedo guarda grande número de campos produtores tanto em reservatórios não fraturados carbonáticos como nos reservatórios elásticos. A atividade de exploração iniciou-se com a descoberta do campo Matínez dei Tineo em 1973 e na década de 80 foram descobertos 11 novos campos: Pozo Escondido, Las Avispas Este, Canada Grande, La Estrela, Dos Puntitas, Pozo dei Pato, El Divasadero Sur, El Vinalar Norte, Puesto Climaco, La Reina, La Bolsa e Yacarecito.

A quantidade de poços perfurados superou 80 de exploração e 100 de desenvolvimento, com descoberta de cerca de 3 MMm<sup>3</sup> de hidrocarbonetos.

A possibilidade de trapas são variadas, tais como: anticlinais com fechamento para as quatro direções (campos de Dos Puntitas, Tineo, Canada Grande); anticlinais falhados (campos de Puesto Guardián e Climaco) ou monoclinais com fechamento contra falhas normais (campo de Vinalar Norte).

O petróleo produzido tem quantidades de enxofre, parafinas, e conteúdo de CO<sub>2</sub> que variam de 18% em Vinalar Norte a 95% em Martinez dei Tineo. Os múltiplos reservatórios contidos em cada campo sempre constituem acumulações independentes com selo em calcários impermeáveis ou partições pelíticas.

O campo mais importante foi o de Puesto Guardián que produziu mais de 1,4 MMm<sup>3</sup> (45% do total regional). Esta acumulação teve área de 487 Ha com reservatório de 60 m de espessura no qual foram perfurados 20 poços dentre os quais cinco são produtores com média de 39 m<sup>3</sup>/d, pressão inicial do reservatório de 368 kg/cm<sup>2</sup> a uma temperatura de 142°C e o petróleo produzido tinha 36°API com

fator de volume 1,314. Segundo Disalvo *et al.* (2002a) esta produção poderia aumentar com a realização de *side tracks* e perfuração de poços horizontais.

### 3.4.3.8 Reservatórios das formações Palmar Largo e La Tigra

As formações Palmar Largo e La Tigra representam um grupo heterogêneo de rochas vulcânicas e vulcanoclásticas posicionadas em subsuperfície no extremo leste da sub-bacia de Lemas de Olmedo, já na divisa da Argentina com o Paraguai.

Segundo Gómez Omil & Boll (1999) grande parte dos hidrocarbonetos desta região originaram-se no Terciário Superior, onde o fluxo oriundo dos pelitos e micritos da formação Yacoraite migrou lateralmente pendente a cima, através das rochas elásticas e piroclásticas, para se acumular nos centro efusivos. **Tal** migração lateral foi favorecida pelo fato das formações Yacoraite e Palmar Largo apresentarem grande variação vertical devido às intercalações de rochas finas. Exemplos de reservatórios em rochas vulcânicas da Formação Palmar Largo são encontrados nos campos de Palmar Largo, Cariada Rica, El Chivil, Surupí e La Tigra Grande.

As principais trapas efetivas são do tipo estrutural, como anticlinais e domes. Tais altos estruturais formaram-se pela combinação de vários fatores, entre eles os efeitos de um relevo vulcânico original, a compactação diferencial e a inversão tectônica. Alguns efeitos estratigráficos e diagéticos também foram extremamente importantes para a acumulação de hidrocarbonetos. O selo do sistema é formado por sedimentos finos e carbonatos da Formação Yacoraite.

#### 3.4.4 Rocha selante

Aparentemente a rocha selante não é problema nos sistemas petrolíferos da Bacia de Salta. Existem dois tipos de selos com efetividade comprovada nos campos produtores. O primeiro corresponde aos intervalos carbonáticos e pelíticos internos da Formação Yacoraite, com espessuras individuais de até cinco metros com geometria tabular e extensão regional. O segundo tipo corresponde aos níveis pelíticos e evaporíticos da Formação Lomas de Olmedo, com espessura de até 150 m, como no caso dos campos de Caimancito, Cuchuma e Lumbrera, todos estes dispostos sobre calcários fraturados.

Apesar das rochas selantes, assim como os reservatórios fraturados, estarem posicionadas no ápice de estruturas antiformes, estes não apresentam fortes indícios de fraturamentos planoaxiais por se tratarem de pelitos e evaporitos com elevada plasticidade e baixa competência perante a deformação, o que leva a uma elevação de seu potencial selante.

### 3.4.5 Trapas

Os principais campos produtores do noroeste argentino são relacionados a trapas do tipo estrutural, em anticlinais compressivos da faixa dobrada onde ocorre o avanço da frente orogênica andina, contudo trapas estratigráficas e mistas também têm sua importância. Três modelos de trapas são reconhecidos nos campos produtores da Bacia de Salta (Kozlowski *et al.*, 2005):

1) Estruturais e Estratigráficas: nestes casos existe a combinação de lenticularização de corpos arenosos e carbonáticos da Formação Yacoraité com influência de estruturas formadas em falhas de grabens (Figura 20). Este tipo de trapa é comumente encontrado no flanco sul da sub-bacia Lomas de Olmedo, na região do Sistema de Santa Bárbara e Inversão Tectônica Incipiente;

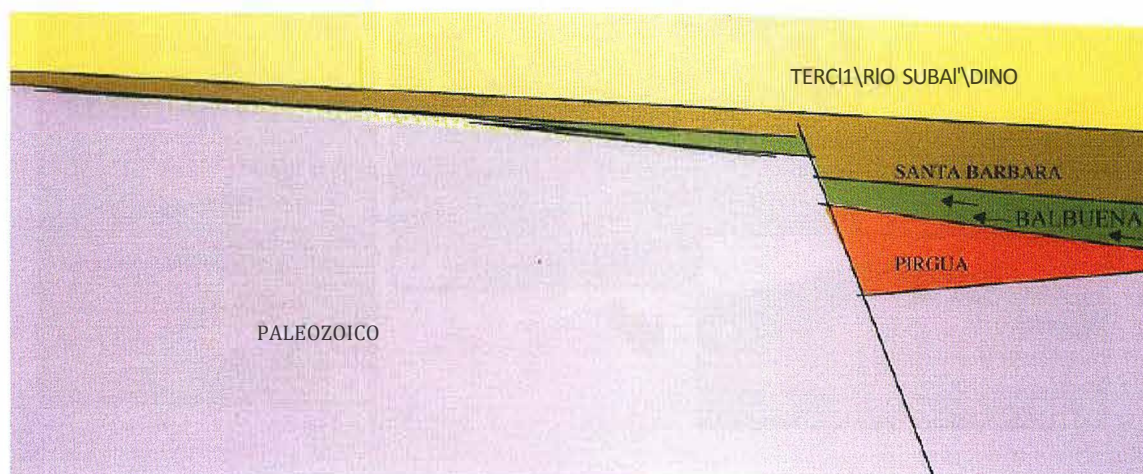


Figura 20 - Modelo de trapas combinadas - estruturais e estratigráficas. (Gómez Omil & Boll, 2005)

2) Estratigráficas em Rochas Vulcânicas: nestes casos as intrusões e efusões vulcânicas criaram relevo deposicional, proporcionando desenvolvimento de altos estratigráficos (platô vulcânico) e ao mesmo tempo contribuindo para a formação de

reservatórios que posteriormente foram sobrepostos por camadas selantes (Figura 21). Mesmo estando situado no domínio estrutural de Deformação Tensional Dominante, a geometria das trapas não tem estirpe estrutural, mas sim estratigráfico. O principal campo produtor é o de Palmar Largo;

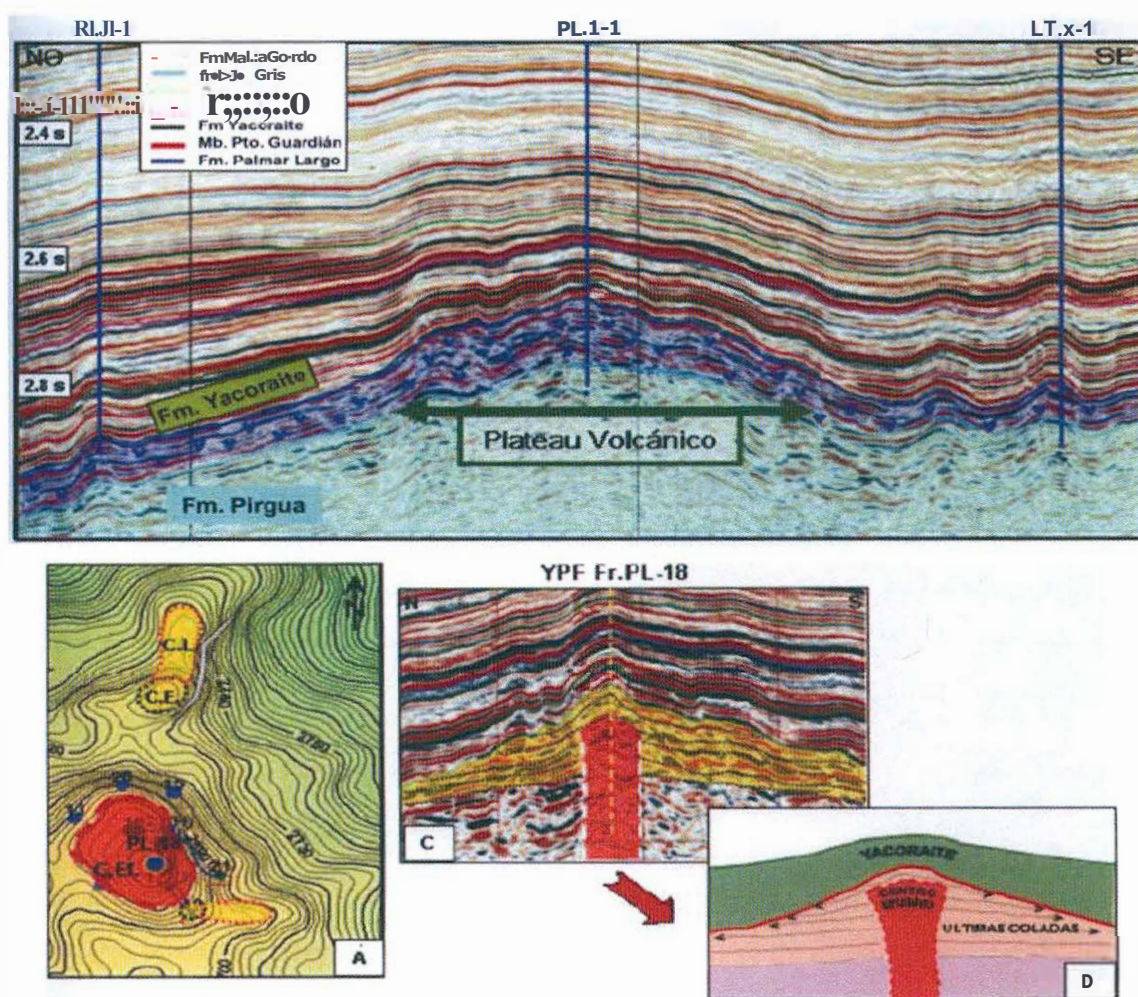


Figura 21 - Modelo de trapas estratigráficas em platôs de rochas vulcânicas (Disalvo *et al.*, 2002b).

1. Estruturais em Dobras Compressivas: este é um dos mais importantes estilos de trapas encontrado na Bacia de Salta. Trata-se de dobras originadas durante a orogenia andina a partir do Mioceno. Este tipo é encontrado

predominantemente no domínio tectônico da Frente Orogênica Norocidental, região situada na zona de avanço da frente orogênica atual.

### 3.4.6 Geração, migração e acumulação

Com o intuito de estabelecer episódios de geração, migração e acumulação de hidrocarbonetos, Gómez Omil & Boll (1999) estudaram os depocentros de Lamas de Olmedo, Metán-Alemania e Tres Cruces.

Na Sub-bacia de Lamas de Olmedo, na posição do depocentro, a geração se iniciou no Oligoceno Inferior (aproximadamente 30 Ma - Ciclo Andino) com subsidência de aproximadamente 3 200 m que progrediu para cerca de 5 500 m no campo de Valle Morado. Isto fez ocorrer a geração primordialmente de óleo e posteriormente gás (Figura 22).



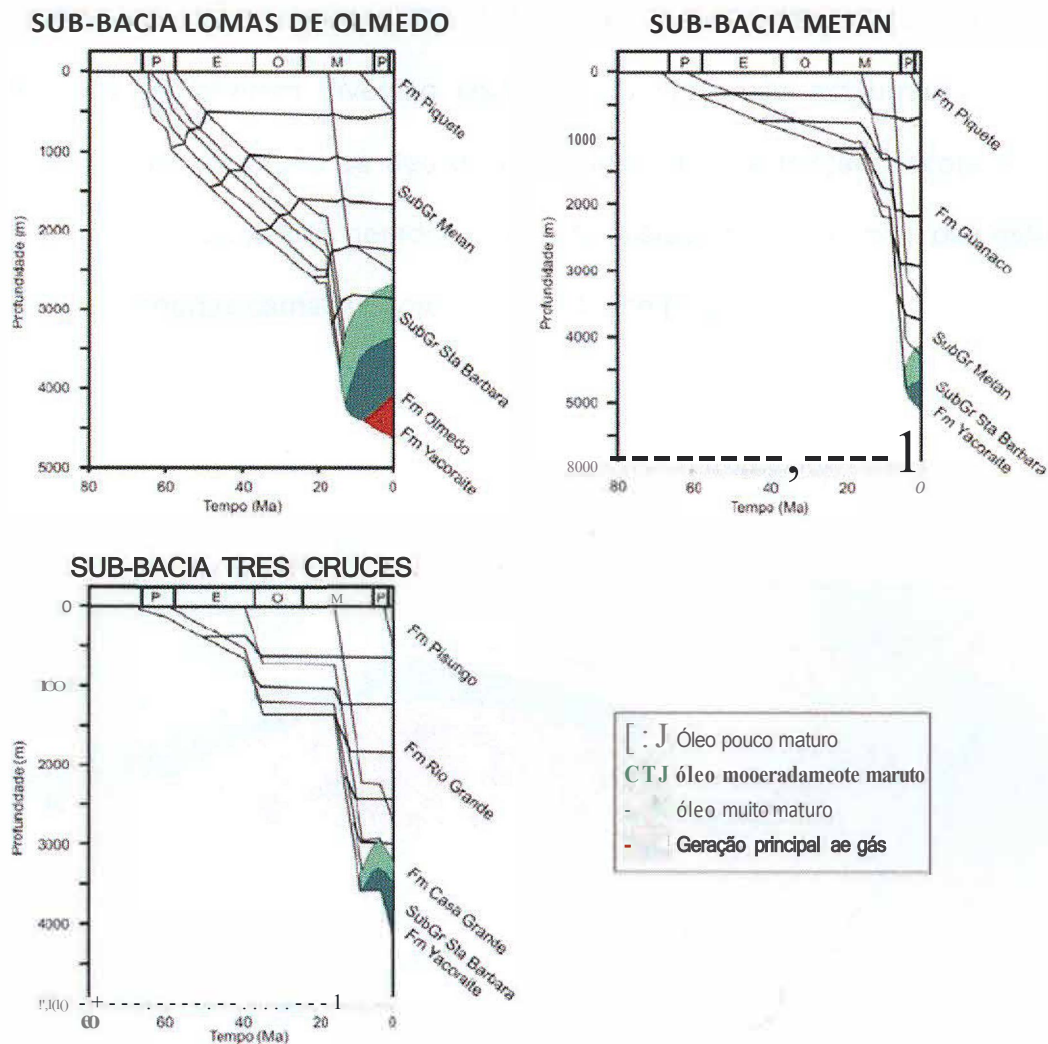
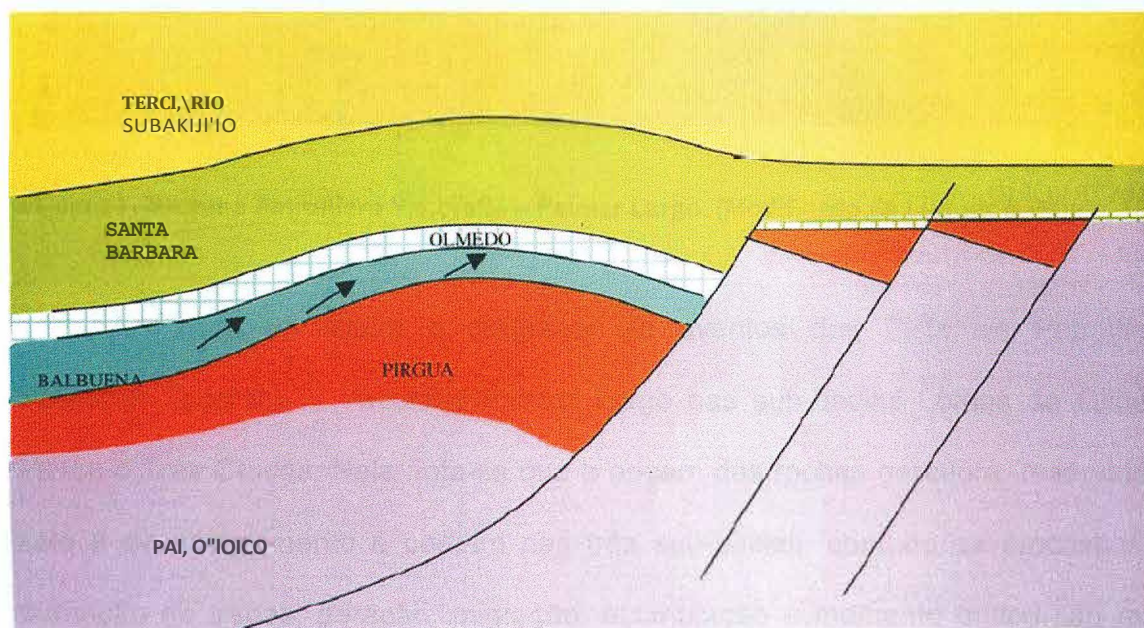


Figura 22 - Modelo de geração (curva de subsidência) de hidrocarbonetos nos principais depocentros. (Modificado de Gómez Omil & Boll, 1999)

Os campos localizados no Flanco Sul ocorrem em posição marginalmente maduras e imaturas com pouca espessura de rocha geradora (menos de 10 m). O processo de migração teve início em concomitância à geração (início do Oligoceno) sendo os pelitos ricos em matéria orgânica da Formação Yacoraité nas rochas fonte. Em reservatórios da Formação Yacoraité localizados em trapas estruturais, a rota de migração acompanhou as falhas que preteritamente representavam as falhas

formadoras do rifte cretáceo (Ciclo Patagônico) cujo qual a partir do Oligoceno (Ciclo Andino) sofreram inversão conformando falhas de empurrão. Contudo, o principal tipo de migração se deu de forma interna à Formação Yacoraite onde o petróleo migrou dos pelitos geradores para os reservatórios no ápice das estruturas através das próprias camadas porosas da unidade (Figura 23).



**Figura 23 - Modelo de acumulação de hidrocarbonetos na Formação Yacoraite em trapas estruturais. (Gómez Omil & Boll, 2005)**

Nos reservatórios de platô vulcânico a rota de migração também foi lateral, pois os pelitos da Formação Yacoraite e as vulcânicas da Formação Palmar Largo são dispostas lateralmente entre si (Figura 24).

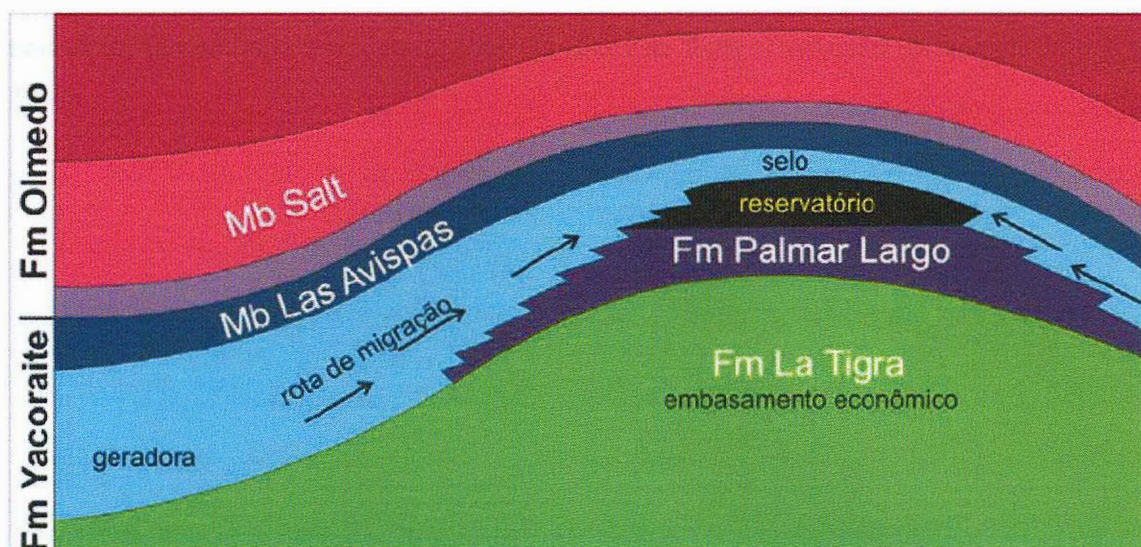


Figura 24 - Sistema Petrolífero Yacoraite - Palmar Largo. (Modificado de Luquez & Palma, 1998)

A Figura 25 ilustra o diagrama de eventos dos Sistemas Petrolíferos Yacoraite-Yacoraite e Yacoraite-Palmar Largo nas sub-bacias Lemas de Olmedo, Metan e Tres Cruces. Nela nota-se que a origem das rochas geradora, reservatório, selo e de soterramento é comum nas três sub-bacias, contudo os processos de formação de trapas, geração, migração, acumulação e momento crítico são muito mais favoráveis na sub-bacia de Lemas de Olmedo, e de fato esta é a única sub-bacia com campos produtores economicamente viáveis.

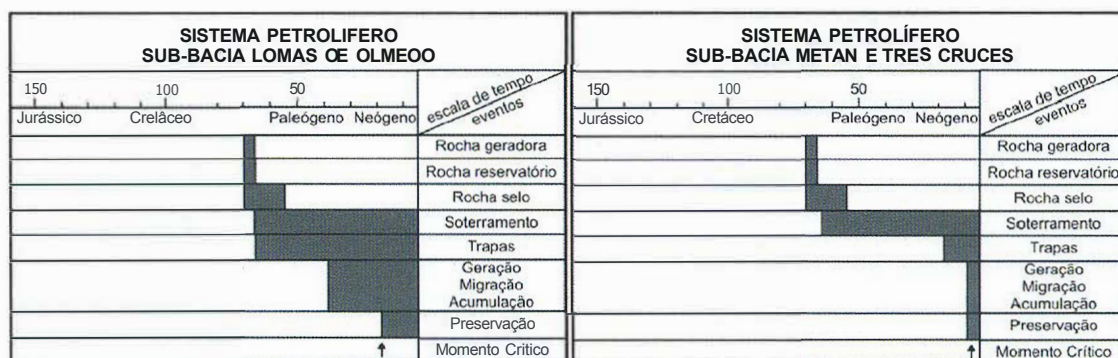


Figura 25 - Diagrama de eventos dos sistemas petrolíferos Yacoraite-Yacoraite (!) e Yacoraite-

Lomas de Olmedo nos três depocentros da Bacia de Salta (Traduzido de Gómez Omil & Boll, 1999).

### 3.5 Histórico de produção de hidrocarbonetos

As primeiras menções sobre a descoberta de existência de hidrocarbonetos no noroeste argentino dizem respeito a padres jesuítas na região de Aguaraque, em 1787 que viram exsudações de petróleo. Entretanto, o primeiro trabalho de cunho geológico nesta região foi feito por Alcides D'Orbigny (1839 *apud* Disalvo, 2002). Estas descobertas diziam respeito apenas à Bacia de Tarija, de idade paleozóica.

A primeira descoberta com aplicação econômica ocorreu em 1926 no Campo de Bermejo, situado na Bacia de Tarija, Bolívia, através da empresa *Standard Oil Company of New Jersey*. A produção de óleo neste campo foi lucrativa por um período de aproximadamente dez anos. A partir deste momento, o aumento da demanda e a queda de produção dos poços foi tornado-os cada vez menos rentáveis economicamente, pois não se conseguia ultrapassar os 2.700 m de profundidade até esta época.

Entretanto, no começo da década de 1940 a empresa YPF passou a utilizar equipamentos de perfuração com capacidade de perfurar poços com maiores profundidades aumentando, assim, a produtividade. Desta forma, esta empresa contribuiu para ampliar os limites da fronteira exploratória, alcançando campos situados em intervalos estratigráficos profundos.

Exsudações naturais de petróleo foram observadas na província de Jujuy (vizinha da província de Salta), na Formação Yacoraite. Estas exsudações vêm sendo analisadas desde o século passado. Entretanto, a Bacia de Salta era deixada em segundo plano, comparando-se à Bacia de Tarija, (citada anteriormente) pela seguinte razão: embora a Formação Yacoraite possua anticlinais maiores e mais

propícios à existência de óleo que os anticlinais da bacia de Tarija, a prospecção na Bacia de Salta era comprometida, ainda, por dificuldades operacionais em profundidades superiores a 3.000 m.

Outro exemplo de dificuldades operacionais é citado por Turic & Ferrari (1999), em que a *YPF* fez sua primeira perfuração, na década de 30, na estrutura de Rio Colorado, no Campo de Caimancito (Figura 17). A perfuração foi abandonada a 4.520 m de profundidade sem conseguir alcançar a Formação Lumbrera (Figura 17). Outras companhias também não obtiveram sucesso, tais como a *Ultramar*, em Salta, a *Colorado Co.*, em Metán e a *Astra*, em Chuchumba entre algumas outras.

Ainda assim, em 1969, a *YPF* voltou a Caimancito e conseguiu perfurar um poço em um grande anticlinal além dos 4.000 m de profundidade, conseguindo finalmente atravessar a Formação Yacoraité dando origem a produção de óleo a uma taxa de 1.000 m<sup>3</sup>/dia. Isto motivou a investigação de estruturas análogas nas províncias vizinhas de Salta e Jujuy e obteve-se êxito em sondagens nos campos de Martínez de Tineo e Puesto Guardian.

Mesmo com este êxito, na década de 70 a exploração voltou-se para a Bacia de Tarija novamente, pois foram descobertos bons volumes de gás em arenitos devonianos (Figura 17) situados em camadas mais profundas. Mais uma vez a Bacia de Salta foi posta em segundo plano.

### **3.5.1 Flanco sul**

No final da década de 70 e toda década de 80 surgiu a necessidade de se encontrar petróleo, pois o mercado de gás já estava totalmente suprido. A atenção passou a ser voltada para a bacia cretácea e a Formação Yacoraite novamente. O Flanco Sul da Sub-bacia de Lamas de Olmedo foi explorado e se desenvolveu o campo de Martinez de Tineo (descoberto em 1973)(Figura 17). Outros prospectas foram buscados nesta bacia, já que até então ela era pouco estudada.

Como consequência foram descobertos campos como Puesto Guardian, Cariada Grande e Vinalar Norte com boas rochas reservatório, principalmente eólicas. Entretanto, para a exploração e produção, não se obteve resultados satisfatórios, pois as estruturas eram cada vez menores e mais sutis. Ainda, não se podia garantir a presença de propriedades petrofísicas das fácies reservatório.

#### **Flanco leste**

Em 1984 foi descoberto o campo de Palmar Largo, passando-se o foco das atenções para uma região mais a leste na Sub-bacia de Lomas de Olmedo. Como a única ferramenta de descoberta de novos campos era a interpretação estrutural baseada em sísmica, em poucos anos a produção ficou comprometida, pois os prospectos viáveis economicamente terminaram.

#### **Flanco norte**

No Flanco Norte foi perfurado um poço em Balbuena, mas a acumulação de óleo não tinha potencial econômico e não chegou a ser explotada. Isto é explicado pelo fato de não ter sido obtidas boas fácies reservatório.

#### **Porção central**

A porção central da Sub-bacia Lomas de Olmedo teve também exploração limitada principalmente devido aos altos custos e problemas de perfuração. Assim, apenas dois campos a leste, Bermejo e Chirete em 1971, e dois a oeste, La Bolsa e Yacarecito em 1989 e 1991 respectivamente, foram explorados. Os poços nestes campos foram perfurados pelas empresas *YPF* e *Pluspetro/ S.A.* e foram alcançados arenitos da Formação Yacoraite nos quatro campos citados. Porém, estes arenitos não eram economicamente viáveis a longo prazo.

### **Sub-bacia de Metán-Alemanía**

A Sub-bacia de Metán-Alemanía também foi explorada. Após aquisição sísmica na região e alguns trabalhos de exploração, alguns poços foram perfurados pela empresa *Pluspetrol*: Cuchuma, Lumbrera, Metán, Yatasto, Coronel Moldes, El Arenal e La Troja. Apenas indícios de óleo foram encontrados.

### **Puna**

Trabalhos detalhados de superfície e sub-superfície mostraram a presença de estruturas e geração de hidrocarbonetos na região de Puna. A *YPF* e a *Texaco* fizeram algumas perfurações de poços nesta região, porém nenhuma com sucesso.

A partir de 1989 houve um aumento na demanda de gás no noroeste argentino, devido a novas leis que regem a indústria que passaram e entrar em vigor naquela época. Uma maior ênfase era dada ao gás devoniano profundo. Desta forma, novos campos foram descobertos, tais como o Campo de Valle Morado, formado por um anticlinal (análogo ao do Campo de Caimancito, já citado) localizado a uma profundidade de 6.000 m. A esta profundidade, e nas condições geológicas adequadas deste campo, houve produção de gás. Entretanto, seis meses após boa produção, este campo passou a produzir muita água reduzindo seu potencial econômico.



Embora a produção neste campo tenha decaído, sua descoberta, nesta profundidade, foi resultado de uma série de desenvolvimentos tecnológicos tais como:

- Perfuração horizontal;
- Utilização de poços desviados;
- Diminuição do custo de perfuração;
- Avanços no imageamento dos reservatórios, permitindo visualizar melhor zonas porosas e permeáveis em reservatórios fraturados;
- Modelos de deformação e análise tectônica, que permitem determinar zonas fraturadas e as orientações de estruturas;
- Sísmica 3D, facilitando a exploração e produção com redução de custos.

No que diz respeito aos *plays* petrolíferos, Disalvo (2002) menciona a formação Yacoraite como ainda importante, embora clássica. Ele menciona, ainda, a Formação Lecho como possibilidade para um novo *play* de exploração futura.

Em suma, a Bacia de Salta não parece apresentar boas perspectivas exploratórias de hidrocarbonetos a longo prazo. Pelo que foi visto, a produção de hidrocarbonetos tenderá a declinar na proporção em que os campos de gás forem gradualmente se exaurindo, implicando em aumento nos custos operacionais nos poços situados nestes campos. Um fato que poderia atenuar esta tendência seria o surgimento de novos campos como os de El Limón e Alto de Yariguarenda, juntamente com aumento de campos senis.

## 4 FUNDAMENTOS TEÓRICOS

### 4.1 Magnetometria

As propriedades magnéticas de alguns materiais terrestres foram observadas por chineses e gregos séculos antes de Cristo. A magnetita ( $Fe_3O_4$ ), com sua peculiar característica de atrair o ferro, moveu a curiosidade humana por séculos até que, em 1600, Sir William Gilbert (1540-1603) apresentou em bases científicas o trabalho mais completo sobre o tema. O livro de Gilbert discutia a bússola magnética, o comportamento de um ímã propriamente dito com seus poderes de atração e repulsão, a distinção entre a ação magnética e a ação (elétrica) do âmbar e o envolvimento de cada ímã por uma "órbita invisível de virtude", que afetava qualquer pedaço de ferro que fosse colocado em sua vizinhança. O livro discutia, também, como um ímã de forma esférica poderia desempenhar o papel da Terra e com o auxílio de pequenos ímãs, demonstrava o comportamento daquilo que hoje chamamos de campo magnético terrestre, explicando a propriedade da agulha da bússola de sempre apontar para o Norte ou para o Sul, a declinação magnética e a inclinação magnética. (UFSM, 2007).

Com a continuidade dos estudos sobre o campo magnético terrestre, métodos de análise desse campo (métodos magnéticos) se desenvolveram e, de forma tal que, este foi um dos primeiros métodos geofísicos a ser empregado em prospecção e as primeiras medidas sistemáticas datam de 1640 na Suécia. Os métodos de observação foram aperfeiçoados ao longo dos anos e, em 1870, os cientistas já dispunham de instrumentos capazes de medir as variações das componentes horizontal e vertical do campo magnético e sua inclinação (Luiz, 1995)

Os métodos magnéticos e gravimétricos apresentam diversos aspectos em comum. Mas os métodos magnéticos são geralmente mais complexos, sendo as variações no campo magnético, localizadas e erráticas. Isto devido, parcialmente, a diferença entre o campo magnético dipolar e o campo gravitacional monopolar; parcialmente, pois há variação da direção do campo magnético, enquanto o campo gravitacional está sempre na vertical; e, parcialmente, à dependência temporal do campo magnético: o campo gravitacional é invariante no tempo (ignorando-se pequenas variações devido às mares). De modo geral, um mapa gravimétrico é dominado por variações regionais, ao passo que, um mapa magnético geralmente mostra uma gama de anomalias localizadas. Variações no campo magnético são freqüentemente indícios de estruturas minerais, e o método magnético é o mais versátil das técnicas geofísicas de prospecção (Telford, 1990)

A maioria das medidas magnéticas é realizada com o instrumento na superfície do terreno ou, ainda, em aeronaves. As medidas podem ser realizadas também em áreas cobertas por água ou em poços perfurados. Os minerais responsáveis pelas distorções do campo magnético terrestres observadas nos trabalhos de prospecção são a magnetita, a pirrolita e a ilmenita (Luiz, 1995).

#### **4.1.1 Fundamentos Teóricos**

De um modo geral, a teoria magnética pode ser dividida em teoria clássica e teoria moderna do magnetismo. A teoria que descreve o magnetismo de forma similar às teorias gravitacional e elétrica é a teoria clássica. Nessa abordagem, o conceito básico é que monopólos magnéticos pontuais seriam análogos a cargas elétricas e massas pontuais (Telford, 1990). Já na teoria moderna, os campos

magnéticos são gerados em decorrência do movimento de cargas elétricas. Elétrons orbitando núcleos atômicos e girando em torno do próprio eixo, são exemplos na escala atômica. Na escala macroscópica, essas correntes são tão pequenas que podem ser tratadas como dipolos magnéticos. De um modo geral, essas correntes tendem a se cancelar, devido à orientação aleatória que os átomos estão sujeitos. Porém, quando um campo magnético é aplicado, um alinhamento desses dipolos ocorre e o meio se torna magneticamente polarizado (Griffiths, 1989)

De um modo **B** toda a teoria envolvendo campos eletromagnéticos podem ser retiradas das equações de Maxwell abaixo:

Tabela 1- Equações de Maxwell

$$\nabla \cdot \mathbf{D} = \rho_v \quad (1)$$

$$\nabla \cdot \mathbf{B} = 0 \quad (2)$$

$$\nabla \times \mathbf{E} = -\frac{\partial \mathbf{B}}{\partial t} \quad (3)$$

$$\nabla \times \mathbf{H} = \mathbf{J} + \frac{\partial \mathbf{D}}{\partial t} \quad (4)$$

As equações relacionadas com o campo magnético são a (2) e a (4). A equação (2) ilustra matematicamente a não existência do monopólo magnético (não observado até os dias atuais). As equações (3) e (4) mostram que variações no tempo de campos elétricos geram campos magnéticos e vice-versa.

1)  
 I?  
 E  
 H  
 J

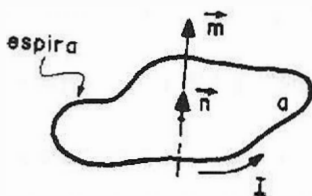
} tem que ser definidas

### 4.1.2 Momento de dipolo Magnético

De acordo com a abordagem moderna, a unidade fundamental do magnetismo a nível macroscópico é denominada momento de dipolo magnético.  $\vec{m}$  é definido como:

$$\vec{m} = \frac{Ia}{c} \vec{n} \quad (5)$$

Sendo  $I$  a corrente que flui na espira que limita a área  $a$ ,  $c$  a velocidade da luz e  $\vec{n}$  o vetor unitário normal à área limitada pela espira. (Luiz, 1995)



figura

Figura 26 - Representação do momento de dipolo magnético (Luiz, 1995)

### 4.1.3 Campo Magnético e Força Magnética

Para definir-se um campo magnético de modo análogo a um campo elétrico, mais uma vez seria necessária a existência do monopólo magnético. Como não é possível fazer desta forma, defini-se o campo magnético  $\vec{B}$  em termos da força

magnética  $p_B$  exercida sobre uma partícula de teste eletricamente carregada e em movimento (Halliday, 2003).

$$F = qv \times B \quad (6)$$

#### 4.1.4 Magnetização e Campo Auxiliar H- O campo magnético dentro da matéria

Na presença de um campo magnético, a matéria se torna magnetizada; ou seja, sobre análise microscópica, serão encontrados vários *pequenos* dipolos alinhados numa *rede* ao longo de alguma direção. Dois mecanismos para essa polarização magnética são:

- Paramagnetismo - dipolos associados com os *spíns* dos eletros desemparelhados experimentam um torque tendendo a alinhá-los paralelamente ao campo;
- Diamagnetismo - a velocidade orbital dos elétrons é alterada de uma maneira tal que há uma mudança no momento orbital de dipolo numa direção oposta ao campo. (Griffiths, 1989).

O Ferromagnetismo é característico de materiais que possuem na sua composição principalmente ferro e níquel, onde esses elementos possuem alguns elétrons com seus momentos resultantes de dipolo magnéticos alinhados produzindo, assim, regiões com fortes campos magnéticos. Diferentemente dos dois casos anteriores, quando o campo magnético externo é desligado, os materiais ferromagnéticos ainda mantêm sua magnetização por um certo tempo.(Halliday, 2003).

A magnetização é medida em termos de  $M$  (também conhecido como momento de dipolo por unidade de volume). (Luiz, 1995)

Como o campo elétrico, o campo magnético microscópico dentro da matéria varia consideravelmente de ponto para ponto e de instante para instante. Quando se fala em *campo magnético dentro da matéria*, de um modo geral refere-se ao campo macroscópico: a média de regiões *grandes* o suficiente para conterem muitos átomos.

É possível separar-se a densidade de corrente  $\mathbf{J}$  em  $\mathbf{J} = \mathbf{J}_b + \mathbf{J}_f$ , onde os índices  $b$  e  $f$  significam, respectivamente, a corrente com respeito a magnetização e a corrente livre com respeito a um campo externo. A densidade de corrente proveniente da magnetização se origina de vários dipolos atômicos alinhados. (Griffiths, 1989).

Dessa forma, é conveniente introduzir o campo auxiliar  $\mathbf{H}$  a fim de se poder definir campo magnético em termos apenas da densidade de corrente livre  $\mathbf{J}_f$  equação (4).

$$\mathbf{H} = -\frac{1}{\mu_0} \nabla \times \mathbf{M} \quad (7)$$

Se a magnetização for constante, o corpo é dito *uniformemente magnetizado*. Para pequenos campos magnéticos,  $\mathbf{M}$  é proporcional a  $\mathbf{H}$  e aponta na mesma direção de  $\mathbf{H}$ . A constante de proporcionalidade que relaciona  $\mathbf{H}$  e  $\mathbf{M}$  é a *susceptibilidade magnética*, que é definida como:

$$\mathbf{M} = K\mathbf{H} \quad (8)$$

A susceptibilidade é o parâmetro fundamental das rochas no método magnético. A resposta magnética é determinada pela quantidade e pela susceptibilidade dos materiais magnéticos presentes nas rochas e minerais. A indução magnética total observada pode ser obtida da equação (7) e pode ser escrita como:

$$B = \mu_0 (H + M) = \mu \mu_0 H \quad (9)$$

Onde  $\mu$  e  $\mu_0$  são, respectivamente, a permeabilidade do espaço e do vácuo. (Telford, 1990)

#### 4.1.5 Relação B-H: A curva de Histerese

A curva que relaciona o vetor indução Magnética total B com o campo auxiliar H chama-se *histerese*. Para materiais ferromagnéticos a relação entre essas duas grandezas é bastante complexa. Na figura 2 estão ilustradas as diversas etapas desse ciclo:

- a. Quando o campo magnético externo é ligado (representado pelo campo auxiliar H no eixo das abscissas), observa-se que a indução magnética aumenta até atingir a saturação.
- b. Quando o campo externo é desligado, o valor de B não volta para zero e não retorna pelo mesmo caminho, mas apresenta um valor positivo quando  $H = 0$ . Isto é chamado de magnetismo residual ou remanente.
- e. Para que B chegue ao valor de zero é preciso que H apresente valores negativos, o que é conhecido como *força coerciva*.



- d Para determinados valores suficientemente grandes em módulo para  $H$ , ocorre nova saturação, desta vez na parte inferior do gráfico.

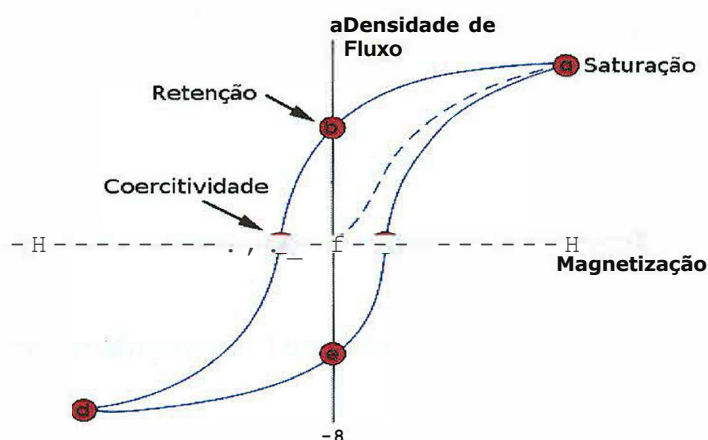


Figura 27 - Curva de Histerese

#### 4.1.6 Potencial Magnético

A partir do campo auxiliar  $H$  é possível obter-se a função potencial magnético, uma vez que o campo magnético é também um campo conservativo. Logo, pode ser obtido a partir do gradiente de uma função escalar: (Luiz, 1995).

$$H = -\nabla A \quad (10)$$

O potencial escalar pode ser explicitado na forma abaixo, o que caracteriza a própria equação de *Poisson*: (Griffiths, 1989).

$$A(r) = \frac{\mu_0}{4\pi} \int \frac{J(r')}{r} dr' \quad (11)$$

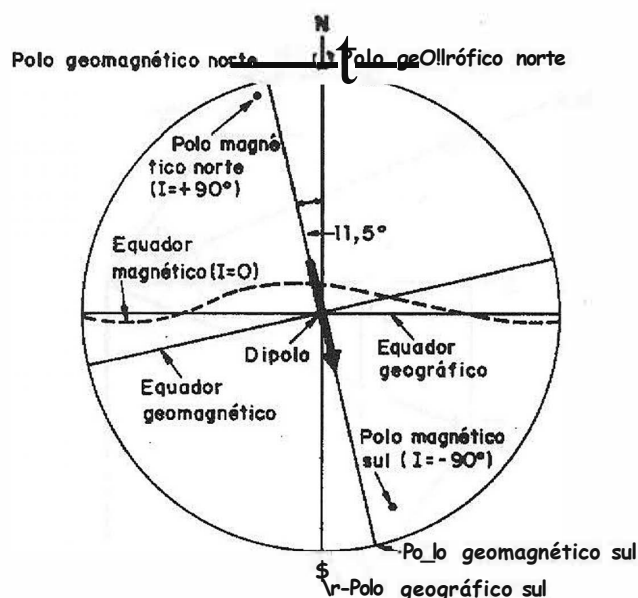
O potencial magnético em um ponto p distante r de um dipolo é (Luiz, 1995):

$$A = \frac{Im \cos \theta}{r^2} \quad (12)$$

#### 4.1.7 O campo Magnético Terrestre

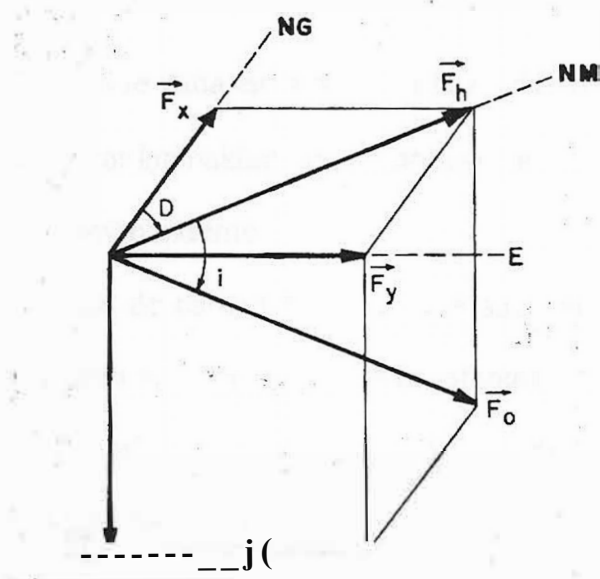
Medidas efetuadas na superfície da Terra sugerem que o campo magnético terrestre pode ser aproximado pelo campo produzido por um momento de dipolo localizado no seu centro. Este momento aponta para o pólo sul geográfico e se localiza sobre um eixo que forma um ângulo de aproximadamente  $11,5^\circ$  com o eixo de rotação da Terra (figura 28).

O eixo do dipolo terrestre intercepta a superfície da Terra nas coordenadas aproximadas de  $78,5^\circ$  N- $69^\circ$  W e  $78,5^\circ$  S- $111^\circ$  E, determinando o que se chama de *pólos geomagnéticos*. Estes pólos, de fato, não devem ser confundidos com os verdadeiros pólos magnéticos, definidos nas posições onde uma agulha magnetizada inclina-se com ângulo de  $90^\circ$  em direção a superfície da Terra. As coordenadas dos pólos magnéticos verdadeiros são aproximadamente  $75^\circ$  N- $101^\circ$  W e  $67^\circ$  S- $143^\circ$  E, o que indica que eles não são diametralmente opostos. (Luiz, 1995).



**Figura 28 - representação esquemática do dipolo aproximado para o campo terrestre (Luiz, 1995)**

O campo magnético da Terra ( $F_0$ ) é caracterizado em qualquer ponto da superfície terrestre pelos seguintes elementos (FIGURA 29): pelas componentes horizontal ( $F_h$ ) e vertical ( $F_v$ ), pelo ângulo de inclinação com a horizontal ( $i$ ) e pelo ângulo de declinação ( $D$ ) formado entre ( $F_h$ ) e a direção do norte geográfico. A componente horizontal pode ser decomposta em duas outras: a componente  $F_x$  (componente norte), na direção do norte geográfico, e a componente  $F_y$  na direção perpendicular. O campo magnético  $F_0$ , e as componentes  $F_h$  e  $F_v$ , bem como a inclinação ( $i$ ) estão todos num mesmo plano vertical. (Luiz, 1995).



**Figura 29 - representação geométrica do campo magnético terrestre e seus elementos. (Luiz, 1995)**

A partir da figura acima, algumas relações trigonométricas entre o campo magnético e os seus elementos podem ser estabelecidas, entre elas: (Luiz, 1995).

$$F_x = F_0 \cos(i) \cos(D) \quad (13)$$

$$F_z = F_0 \sin(i) \quad (14)$$

#### 4.1.8 Natureza do campo geomagnético

O campo magnético da Terra é composto por de três partes:

- O campo principal que varia lentamente, e tem origem interna;
- Um campo de menor intensidade que o principal e que varia mas rapidamente e que origina o campo externo;
- Variações espaciais do campo principal, que são geralmente menores que o campo principal, são aproximadamente constantes no tempo e espaço, e são causadas por anomalias magnéticas locais na superfície da Terra. Estes são os alvos da análise magnetométrica (Telford, 1990)

#### **4.1.9 Magnetismo dos Materiais**

As substâncias ou materiais apresentam comportamentos distintos quando submetidas a um campo magnético. Os materiais, em relação à resposta a um campo magnético, podem ser *diamagnéticos*, *paramagnéticos* ou *ferromagnéticos*.

Substâncias diamagnéticas, quando submetidas a um campo magnético, adquirem magnetização de intensidade fraca e sentido contrário ao do campo. A fraca intensidade da magnetização provém do pequeno valor de susceptibilidade magnética dessas substâncias. O sinal negativo para a susceptibilidade está relacionado com o sentido contrário ao campo.

As substâncias paramagnéticas apresentam baixa susceptibilidade magnética, porém com sentido igual ao do campo.

Com susceptibilidade magnética elevada, as substâncias ferromagnéticas apresentam forte magnetização e no mesmo sentido do campo. (Luiz, 1995).

#### **4.1.1 O Magnetização das Rochas**

A magnetização observada nas rochas, como resultado da presença de minerais magnéticos na sua composição, pode ser classificada em dois tipos:

magnetização induzida e magnetização residual remanescente ou remanente. A magnetização induzida é provocada pelo campo da Terra em si, enquanto a magnetização remanescente é adquirida ao longo da história geológica da rocha.

Dentre os diversos tipos destacam-se:

- Magnetização termoremanente;
- Magnetização química;
- Magnetização deposicional;
- Magnetização viscosa;
- Magnetização piezo-remanescente (Luiz, 1995).

#### **4.1.11 Instrumentos de Medição - Magnetômetros**

Antes da utilização dos magnetômetros, bússolas e variômetros magnéticos foram amplamente utilizados. Somente após a segunda guerra mundial surgiram os magnetômetros. Magnetômetros registram o valor da intensidade do campo magnético, ou campo total, ou uma ou mais de suas componentes. Os magnetômetros podem ser dos seguintes tipos:

- Saturação (flux-gate);
- Precessão nuclear ou precessão de prótons;
- Bombeamento óptico e supercondutividade (SQUID).

A sensibilidade requerida para os magnetômetros está compreendida entre 1 e 10 nT num campo total na faixa de 50000 nT. Desenvolvidos recentemente, alguns magnetômetros atingem 0,001 nT de precisão.

#### 4.1.11.1 Magnetômetro de Saturação (Flux-Gate)

O magnetômetro de saturação foi desenvolvido durante a segunda guerra mundial para detectar submarinos. Originalmente foi usado para detectar variações no campo diurno da Terra (Telford, 1990).

Esse tipo de magnetômetro contém dois núcleos de material ferromagnético de elevada permeabilidade magnética. Os núcleos são dispostos paralelamente, e cada um é envolvido por uma bobina primária e uma bobina secundária igual, porém enroladas em sentidos opostos. A bobina primária são enrolada em série e recebe uma corrente alternada de baixa frequência, enquanto a bobina secundária está conectada a um voltímetro. A susceptibilidade das duas barras é alta o suficiente para que o fraco campo magnético da Terra possa produzir saturação nas barras. Na ausência de um campo externo, o voltímetro registra zero, já que os campos induzidos nas bobinas são iguais, porém com sentidos opostos.

A intensidade do campo total ou de qualquer uma de suas componentes pode ser medida utilizando-se uma orientação conveniente dos núcleos ferromagnéticos. A precisão dos magnetômetros de saturação é de 1 nT e o intervalo de medidas é de  $\pm 100.000$  nT.

#### 4.1.11.2 Magnetômetro de Precessão Nuclear

Instrumento desenvolvido a partir da descoberta da ressonância magnética nuclear em 1945. Alguns núcleos apresentam momento magnético total que, acoplados com seus *spins*, acarretam numa precessão desses átomos em torno de um eixo magnético (campo magnético).

O magnetômetro de precessão nuclear de prótons depende da frequência livre de precessão desses prótons que foram polarizados numa direção normal ao campo da Terra. Quando o campo polarizador é subitamente retirado, os prótons precessam em torno do campo magnético terrestre. A frequência angular com que a precessão ocorre é conhecida como frequência de *Larmor*, e é proporcional ao campo magnético  $F$ , de modo que:

$$\omega = \gamma_p F \quad (15)$$

A constante  $\gamma_p$  é a razão giromagnética do próton, a razão entre seu momento magnético e seu momento angular de spin. O valor para  $\gamma_p$  é conhecido com uma acurácia de 0,001 %. Uma vez que medidas precisas de frequências são obtidas, o campo magnético pode ser determinado com a mesma acurácia da razão giromagnética do próton.

Ao precessar, o próton induz numa espira que envolve a amostra, uma tensão que varia com a frequência de precessão  $\nu$ . A equação que relaciona o campo magnético e a frequência de precessão é

$$F = \frac{2h\nu}{\gamma_p} \quad (16)$$

Com esse método apenas o campo total pode ser medido (Telford, 1990).

Os magnetômetros de precessão nuclear podem ser adaptados para levantamentos terrestres, marinhos e aéros. As medidas podem ser feitas na presença de gradientes magnéticos de até 5000 nT/m.



#### 4.1.11.3 Bombeamento óptico

Quando elétrons passam de um nível maior de energia para um menor, uma certa quantidade de energia é emitida. Essa energia pode gerar *masers* ou *lasers*. Magnetômetros utilizam a presença desse fenômeno quântico (Telford, 1990).

Na presença de um campo externo (por exemplo, o campo magnético da terra), os elétrons de valência de um elemento têm o seu nível estável de energia separado em dois subníveis: um deles corresponde ao estado em que o momento magnético devido ao spin do elétron é paralelo ao campo magnético (estado paralelo) e o outro, em que ele é antiparalelo. A excitação desses elétrons por uma fonte de radiação produz dois novos subníveis de energia, que correspondem aos estados paralelo e antiparalelo descritos. E a diferença de energia entre esses estados é proporcional à intensidade do campo magnético.

De um modo esquemático, pode-se representar esse dispositivo apresentando três níveis de energia  $A_1$ ,  $A_2$  e  $A_3$ . Sendo que  $A_3$  representa um estado de energia superior aos outros dois. O objetivo desta técnica é acumular átomos em um desses níveis de energia,  $A_2$  através de irradiação com uma fonte polarizada. À medida que átomos são removidos para o estado  $A_2$  por esse processo seletivo, menos energia é absorvida e a amostra se torna transparente a radiação incidente. A frequência de onde que consegue mover os elétrons entre os estados de energia é igual a:

$$f = \frac{E}{h} \quad (17)$$

Onde  $h$  representa a constante de Planck.

Os elementos Césio, rubídio, sódio ou hélio são comumente usados nos magnetômetros, pois a diferença de energia entre os subníveis, nesses elementos, apresenta valores que podem fornecer medidas precisas do campo magnético da Terra.

Nos magnetômetros, elétrons excitados retornam a estabilidade girando em torno do campo magnético da Terra  $F_0$  com uma frequência:

$$f = \frac{\gamma \cdot F_0}{2\pi} \quad (18)$$

sendo  $\gamma$  a razão giromagnética do elétron.

Os magnetômetros de bombeamento óptico podem medir campos na presença de gradientes magnéticos de cerca de 50000 nT, dessa forma são mais vantajosos que os magnetômetros de precessão de prótons.

#### 4.1.11.4 Gradiômetros

Arranjo de equipamentos idênticos espaçados por uma distância fixa e pequena em relação às fontes de anomalia em investigação. Os sensores são geralmente magnetômetros de precessão de prótons e/ou magnetômetros de bombeamento óptico devido sensibilidade requerida para as medidas.

Nos levantamentos terrestres, a distância comumente usada entre os sensores é da ordem de 1 m a 2 m, e de 30 m para levantamentos aéreos.

A resposta do equipamento é uma razão entre intensidade de campo e comprimento, sendo sua unidade usualmente nT/m. Desta forma, os gradiômetros são isentos dos efeitos de variação diurna e dos efeitos de fontes distantes (Luiz, 1995).

#### 4.1.12 Operações de Campo

Com aplicações no mar, em terra e no ar, a magnetometria, assim como a gravimetria, é utilizada como uma análise preliminar ao trabalho sísmico para estabelecer valores aproximados de profundidade, topografia e características do embasamento.

#### 4.1.12.1 Levantamento Aéreo

##### a) Introdução

Levantamentos aéreos são realizados com aviões ou helicópteros e a escolha do uso entre o primeiro e o segundo se dá a partir dos objetivos a serem investigados, como a busca por alvos pequenos ou grandes; se a altitude de medição é baixa ou alta (Luiz, 1995).

De um modo geral, a sensibilidade do equipamento usado nos levantamentos aéreos é maior que a sensibilidade em levantamentos terrestres e está na faixa de 0,01 nT contra os 10 a 20 nT praticados no segundo. Devido ao grande custo operacional, os equipamentos utilizados tendem a ser mais sofisticados e mais onerosos do que equipamentos portáteis.

##### b) Montagem dos equipamentos de medição

Um aspecto que é levado em conta nos levantamentos aéreos é a montagem do aparato de medida. Enquanto detector de campos magnéticos, a influencia do próprio avião afeta as medidas, e como solução geralmente adotada o equipamento é disposto a uma certa distância da fuselagem do avião ou helicóptero. Montado numa caixa cilíndrica conhecida como *bird*, o equipamento é conectado a aeronave por um cabo que pode ter entre 30 a 150 m e está mais próximo do terreno do que a aeronave em si.

#### **e) Estabilização**

Para a realização de medidas confiáveis, os equipamentos precisam estar dispostos na aeronave de forma a se manterem estáveis e de acordo com as condições de medidas para as quais foram construídos. Para os detectores de precessão nuclear, o problema de orientação estável é minimizado uma vez que estes medem o campo total, e para tal, não podem apresentar seus campos de polarização alinhados com o campo magnético da Terra. Como a tolerância a esse efeito é pequena o problema é praticamente eliminado.

A estabilização do magnetômetro de saturação é mais complicada de um modo geral já que o elemento sensível precisa ser mantido no eixo do campo  $F$ . Como solução a este problema, um sistema tridimensional cartesiano é montado com a adição de mais dois magnetômetros disposto ortogonalmente entre si. Quando um dos magnetômetros é corretamente alinhado com o eixo do campo total, o sinal dos outros dois precisa ser exatamente zero. Quaisquer valores diferentes desse implicam num reajuste do sistema de estabilização para retomar à configuração previamente definida.

#### **d) Padrão de Vôo e efeitos devido às variações de vôo**

Os levantamentos magnéticos são realizados de um modo geral em linhas paralelas espaçadas de 100 m até muitos quilômetros. A altitude é mantida constante ao longo do vôo, sendo a altura controlada e gravada por radio ou altímetros barométricos. O procedimento é complementado com medições na altitude do terreno de variações temporais no campo da Terra devido à variação diurna principalmente. Alterações na altitude e nos padrões de vôo produzem mudanças nas medidas do campo magnético e precisam ser corrigidas.

#### **e) Localização da Aeronave**

O método mais simples de atribuir a localização de uma determinada aeronave para o controle do piloto é usando fotografias aéreas. As fotos são tiradas em intervalos de tempo compatíveis com o intervalo de tempo das medições do campo magnético. Esses dados são usados em conjunto para a localização exata onde foram realizadas medidas.

#### **f) Correções dos Dados Magnéticos**

Os dados magnéticos precisam ser corrigidos sempre que ocorrem diferenças no plano de vôo original. Estas correções geralmente são em deslocamentos, elevação e localização das linhas de medidas.

#### **g) Vantagens e Desvantagens do Levantamento Aéreo**

Custo baixo por quilometro quadrado e alta velocidade são duas das vantagens desse tipo de levantamento. As principais desvantagens estão relacionadas com mineração já que para áreas pequenas, a relação custo / benefício se torna alta **(Telford)**.

### **4.1.12.2 Levantamento Marítimo**

Em regiões cobertas com água, os levantamentos são realizados tanto por embarcações quanto aviões. O uso de embarcações torna o levantamento mais caro e lento em relação ao uso de aviões **(Luiz, 1995)**. Magnetômetros de precessão nuclear e de saturação são geralmente usados nos levantamentos marítimos. As aplicações principais estão relacionadas aos levantamentos oceanográficos em larga escala **(Telford)**.

### **4.1.12.3 Levantamento Terrestre**

#### **a) Introdução**

Usados principalmente para detalhar a presença de minerais, os levantamentos terrestres usam quase que exclusivamente o magnetômetro de precessão de prótons portátil. O espaçamento entre estações varia de 15 a 60 m; ocasionalmente este pode ser da ordem de 1 m **(Telford)**.

Nesse tipo de levantamento, medem-se principalmente valores absolutos do campo magnético ou da sua componente vertical. Raramente a componente horizontal é medida, assim como, raramente são feitas medidas de gradiente de campo (Luiz, 1995).

Para uma precisão maior nas medidas, medições devem ser feitas repetidamente em intervalos curtos de tempo a fim de se minimizarem os efeitos de variação diurna e variações erráticas.

Como a maioria dos magnetômetros apresentam sensibilidade da ordem de 1 nT, as estações não devem ser posicionadas próximas a grandes objetos contendo ferro, como ferrovias etc (Telford).

#### **b) Processamento dos Dados**

Os resultados de um levantamento magnético são expostos como um conjunto perfis ou um de contorno magnético. De um modo geral, as anomalias magnéticas são mais numerosas, complexas, erráticas e maiores se comparadas às anomalias gravitacionais. Através do uso de filtros passa-banda e operações de filtragem não linear, um relativo sucesso na melhoria dos dados é atingido (Telford).

Após o processo de aquisição em campo, o passo seguinte é o processamento dos dados através de *correções* para eliminar variações com causas não geológicas, como variação diurna e o desnível do ponto de amostragem; e, também, *filtragens* para eliminar efeitos geológicos indesejáveis, como interferência entre fontes rasas e profundas, permitindo, assim, uma melhor capacidade de análise das anomalias.

## **e) Correções**

### *Correção da Variação Diurna*

A variação diurna produzida pelo campo magnético externo acarreta em flutuações magnéticas com período de 24 horas e são causadas pelo movimento da ionosfera, devido ao seu aquecimento no lado exposto ao Sol e resfriamento no lado oposto. As amplitudes máximas observadas estão na faixa de 50 a 80 nT e esses valores são atingidos próximo ao meio-dia. Dois procedimentos são utilizados na correção da variação diurna:

1) Quando há disponibilidade de dois magnetômetros, um deles registra o campo magnético continuamente, em uma estação fixa (estação base), enquanto o outro é utilizado para medir o campo nas diversas estações. A correção do valor medido em uma determinada estação é feita somando-se ou subtraindo-se, a variação observada no magnetômetro fixo no momento da medida, e;

2) Quando só há disponibilidade de um único magnetômetro, uma estação do levantamento é reocupada periodicamente (intervalos de 2 a 3 horas) e a variação nas medidas obtidas nessa estação é distribuída linearmente com o tempo, à semelhança do que é feito para corrigir-se o drift do instrumento em gravimetria (Luiz, 1995).

### **d) Correção Topográfica**

Correção que visa a minimizar o efeito de topografia nas medidas de campo magnético devido, principalmente, ao elevado contraste entre terra e ar. De um modo geral, o efeito topográfico é considerado fraco e, portanto, a correção é raramente aplicada (Luiz, 1995).



### e) Filtragens

#### *Remoção do IGRF*

Como o objetivo dos levantamentos magnéticos é obter informações a respeito das anomalias presentes numa determinada região, é preciso que valor total medido seja subtraído de um valor *padrão* de campo magnético específico da região onde foram realizados os levantamentos. O campo normal ou padrão é representado pelo IGRF (International Geomagnetic Reference Field) e seus valores são tabelados e podem ser consultados em mapas ou gerados em computador através de determinados algoritmos. De um modo geral, o IGRF é a representação teórica, para um dado intervalo de tempo, do campo magnético normal da Terra ou campo principal, isto é, do campo que se origina no interior da Terra (**Parasnis**).

#### *Redução ao Pólo*

O caráter dipolar do campo magnético implica em variações de direção e inclinação no campo que torna complexa a análise dos dados. A redução ao polo faz com que uma determinada anomalia seja transferida ao pólo, ou seja, transforma o dado coletado numa latitude arbitraria para o mesmo coletado na latitude de  $90^\circ$  (pólo magnético). A redução ao pólo permite que se localize mais facilmente o posicionamento de fontes de anomalias e evidencia a existência de magnetização remanente, auxiliando, assim, na interpretação dos dados (Luiz, 1995).

## 5 Estudo de Caso

Neste capítulo é apresentado o artigo: "*Open Source Magnetic Inversion Programming Framework and its Practical Applications*" (Mikhail Tchernychev e D.D. Snyder), que foi publicado no *Journal of Applied Geophysics* no ano de 2007.

Neste trabalho os autores desenvolveram um código aberto<sup>1</sup> em C++ em que uma estrutura de programação pré-definida é usada para simular problemas para interpretação magnética a partir de simulação de inversões. Alguns experimentos são demonstrados a título de exemplo e aplicabilidade do código.

### 5.1 Introdução

Ao longo dos anos, a busca por instrumentos de medição com alta-precisão tem intensificado a relação entre fabricantes e usuários desses procedimentos. Apesar do conjunto de ferramentas desenvolvida pelos autores não apresentar requisitos que atendam a demanda comercial, o pacote foi disponibilizado gratuitamente através de licença GNU de forma a ser útil em determinadas situações, como as demonstradas no artigo.

O núcleo do algoritmo é o ajuste de dados com relação ao modelo de dipolo magnético. A nível comercial são poucas as opções para este tipo de modelagem, como sugerem os autores. A nível de licença gratuita não há nenhum pacote disponível com as características do algoritmo desse trabalho.

---

<sup>1</sup> O código fonte aberto significa que o programa pode ser copiado a partir de um local determinado pelos autores, como um sítio de Internet, onde se aplica licença publica GNU.

### 5.1.1 Implementação de inversão: princípios básicos

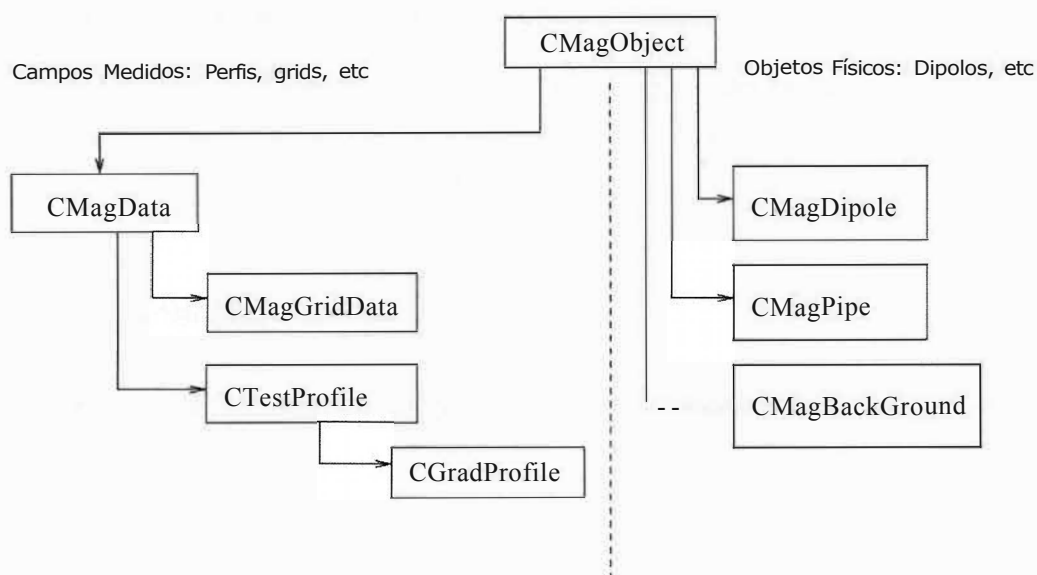
A grande vantagem de um *software* livre é a quantidade de *olhos* que o fiscalizam e que buscam modificações, melhorias. E para que o *software* sobreviva e seja capaz de sofrer alterações benéficas, uma serie de características precisa ser atendida, como:

- Modularidade. partes do código podem ser removidas ou adicionadas sem afetar outras partes do projeto;
- Regras bem definidas para adição de novas propriedades;
- Otimização numérica baseada num código matemático geral a fim de permitir compatibilidade com diversos programas que possam vir a ser usados em conjunto;
- Acomodação de diferentes tipos de dados numa única inversão, como *grid* e outros perfis para estimar a posição de um alvo, por exemplo;
- Tratamento de erros de posicionamento e variação diurna. De um modo geral esses dois efeitos podem ser modelados com funções linear ou constantes sendo, portanto, de relativa simplicidade o tratamento dessas correções;
- Expansão contínua da estrutura do algoritmo a fim de permitir uma também contínua evolução de suas aplicações.

## 5.2 Esboço da implementação de inversão

### 5.2.1 Vista geral da Implementação

A figura abaixo ilustra a estrutura principal do programa e que pode ser separada em classes de *objetos* e de *dados*. As varias classes podem ser separadas em tipos relacionados aos modelos de alvos como, por exemplo, dipolos, tubulações, etc, e tipos que estão relacionados às medidas como perfis, *gdd* de dados, etc. Classes de dados podem ainda ter parâmetros desconhecidos associados que podem ser estimados. Como, por exemplo, perfis repetidos sobre o mesmo alvo magnético podem ter associados erros de deposição (situação típica encontrada em levantamentos marinhos).



**Figura 30 - classes de Objetos e Dados**

### 5.3 Uso da Estrutura - adaptação da estrutura de inversão

É possível utilizar o algoritmo através de um outro software. Do ponto de vista do usuário, a adaptação da estrutura de inversão requer alguns passos gerais, como:

- Criação de dados e coleção de alvos. Estes são os *containers* a serem preenchidos com perfis, *grids*, dipolos, etc;
- Leitura e adição dos dados para a coleção já existente de dados;
- Criação de alvos a serem estimados. Assinalar valores para parâmetros não lineares, etc;
- Criação do objeto de inversão e adição das coleções;
- Estimar valores iniciais para parâmetros lineares;
- Estimar todos os parâmetros usando otimização não linear;
- Coletar parâmetros estimados.

### 5.4 Aplicações

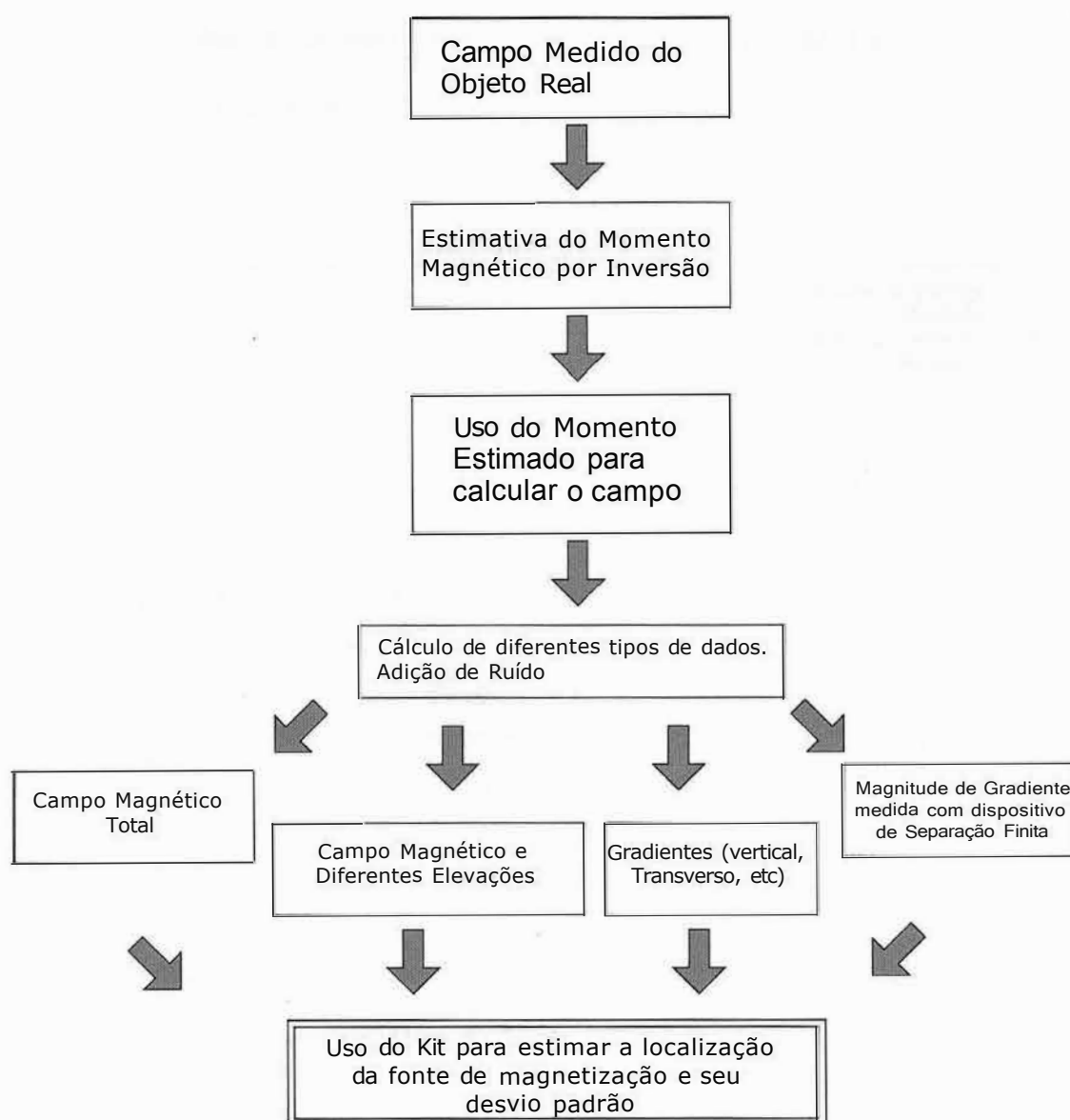
a) Exemplo Semi-numérico: projétil - 30 mm, campo real e campo sintético.

Como primeira aplicação, um projétil de 30 mm, 360 g e 13,5 cm de comprimento foi utilizado para exemplificar a utilização do algoritmo.

A figura 31 ilustra o fluxograma com os procedimentos computacionais para este exemplo. Uma vez que as propriedades magnéticas de objetos metálicos variam amplamente, medidas experimentais foram previamente realizadas. Dessas medidas, foi estimado o momento magnético do projétil. Dado o momento magnético

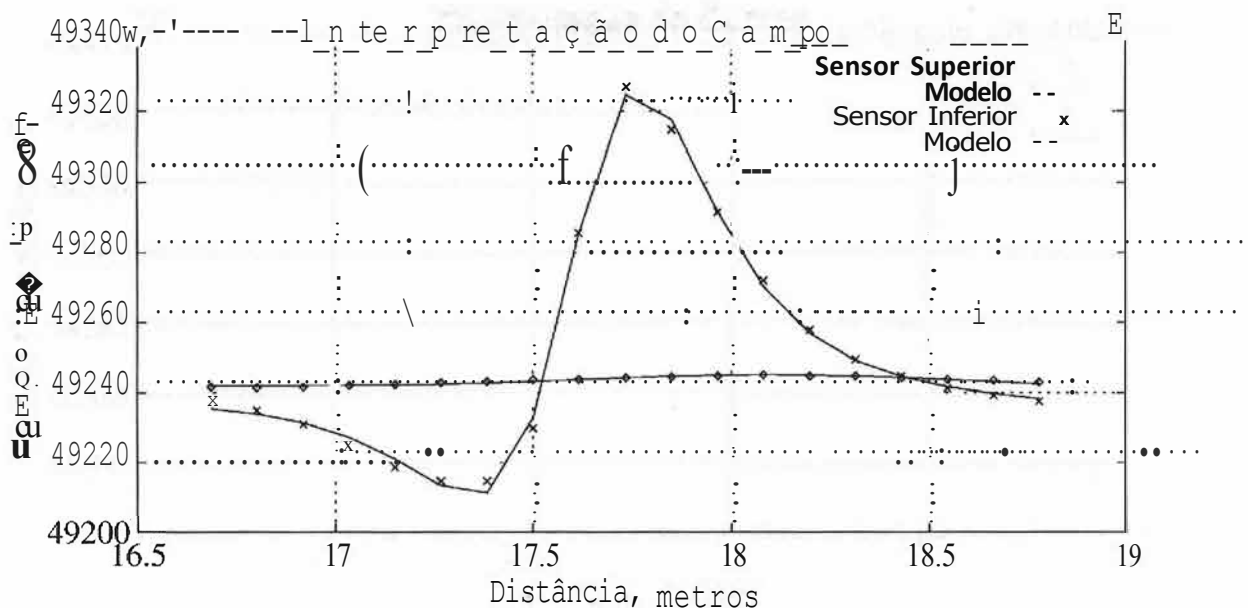
do objeto de estudo, utilizou-se o modelo numérico independente segundo Blakely (1995) para gerar dados simulados para diferentes tipos de medidas magnéticas. Estes dados foram posteriormente contaminados artificialmente com ruído aleatório para melhor simular as medidas do campo magnético. Os dados resultantes foram usados como dados de entrada para a inversão.

O campo do projétil foi medido com o magnetômetro G-858 com dois sensores posicionados no modo de gradiometria vertical.



**Figura 31 - Fluxograma Computacional**

A altura do sensor inferior foi de 30 cm acima do nível do solo. E a distancia de separação dos sensores foi de 1 m. o objeto de estudo foi posicionado logo acima da superfície. Os campos foram medidos em intervalos de 25 cm ao longo de um perfil horizontal indo de oeste para leste. A linha passou exatamente em cima do objeto. Ambos os campos (sensores inferior e superior) foram simultaneamente invertidos para permitir estimativas da localização e do momento magnético do alvo. O campo medido experimentalmente e o campo computado a partir do modelo de dipolo são mostrados na figura 32.



**Figura 32 - Sensores inferior e superior**

O momento magnético estimado tem amplitude 52 unidades cgs e ângulo de  $12^\circ$  relativo ao campo magnético da Terra.

b) Exemplo Semi-numérico: projétil - 30 mm, três linhas.

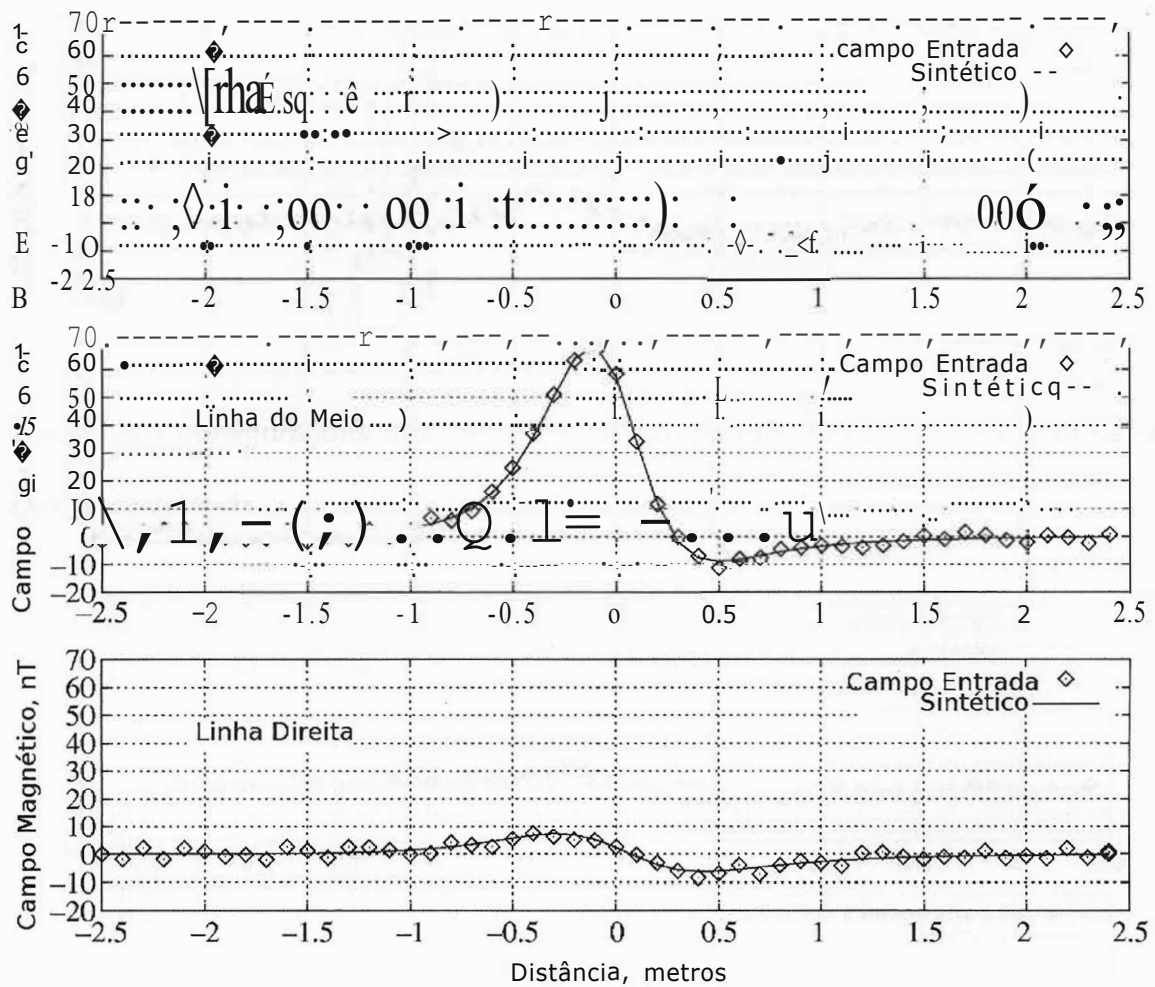
Abaixo seguem os parâmetros usados neste exemplo:

- Um dipolo-alvo com momento magnético de 50 unidades cgs foi posicionado nas coordenadas:  $x=y=0$  e  $z= 0,5$  m, declinação de  $-10,5^\circ$  e inclinação de  $66,7^\circ$  em relação ao campo magnético da Terra;
- Os parâmetros do campo magnético normal da Terra foram definidos como  $60,5^\circ$  de inclinação e  $14,7^\circ$  de declinação;
- O campo sintético foi computado ao longo de três linhas paralelas na direção NS. A distância entre as linhas foi de 0,5m;
- Uma certa quantidade de ruído aleatório (5 nT ou 5 nT/m) foi adicionado ao campos sintéticos para melhor simular os campos reais, em virtude de pequenos objetos metálicos geralmente presentes na região de detecção do sensor inferior.

Como interpolação de *grid* requer uma densa cobertura e introduz uma grande quantidade de erros nas medidas, optou-se apenas pelos perfis apresentados.

1. Medidas do campo magnético total. Neste caso, o campo magnético total foi computado ao longo de três linhas, ruído aleatório foi adicionado, e os resultados foram utilizados como entrada para a inversão. Os campos observados e modelados são mostrados na figura 33.





**Figura 33 - campo total ao longo de três linhas paralelas.**

- Medidas de campo total em 2-níveis (espaçamento de 0,5 m). O esquema está mostrado na figura 34a. Este exemplo apresenta duas vezes o volume de dados quando comparado com o caso acima. Os campos foram tratados separadamente, e não como um gradiente real. Resultados são apresentados na figura 35:

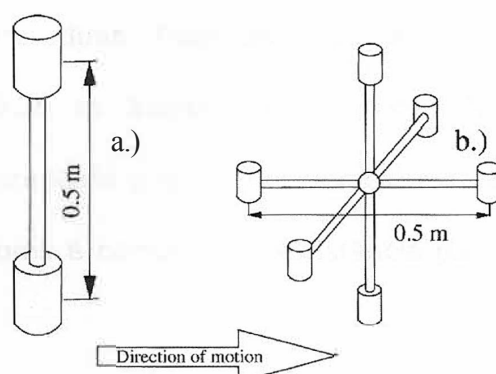


Figura 34 - configurações dos sensores. a) campo total em dois níveis e b) campo total com vetor de gradiente de campo.

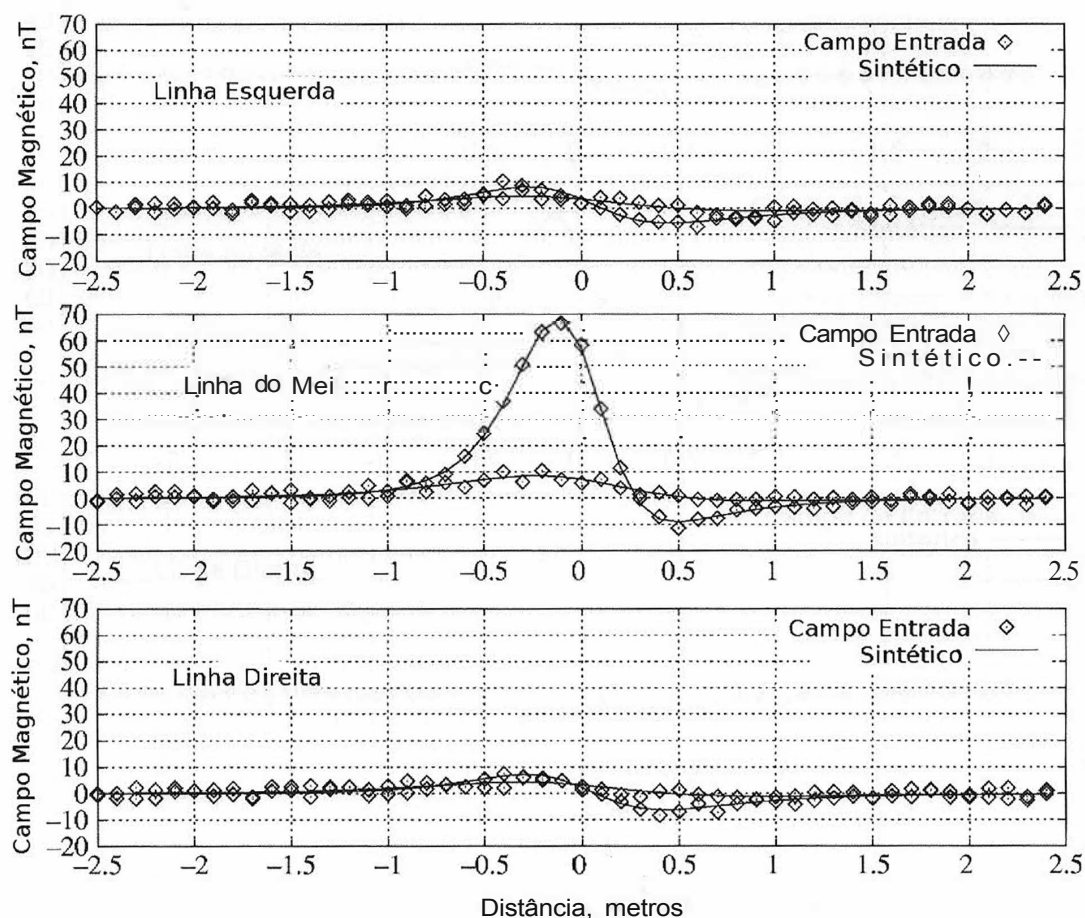


Figura 35 - Campo total em 2-níveis.

3. Medidas de gradiente finito. Neste caso, os campos foram amostrados como no exemplo anterior, porem o gradiente foi estimado como a

diferença entre duas medidas simultâneas. O sensor inferior foi posicionado 0,25 m acima da superfície. Nota-se que o gradiente computado representa o gradiente vertical real, uma vez que a distância entre os sensores é comparável à distância para o objeto. Resultados na figura 36.

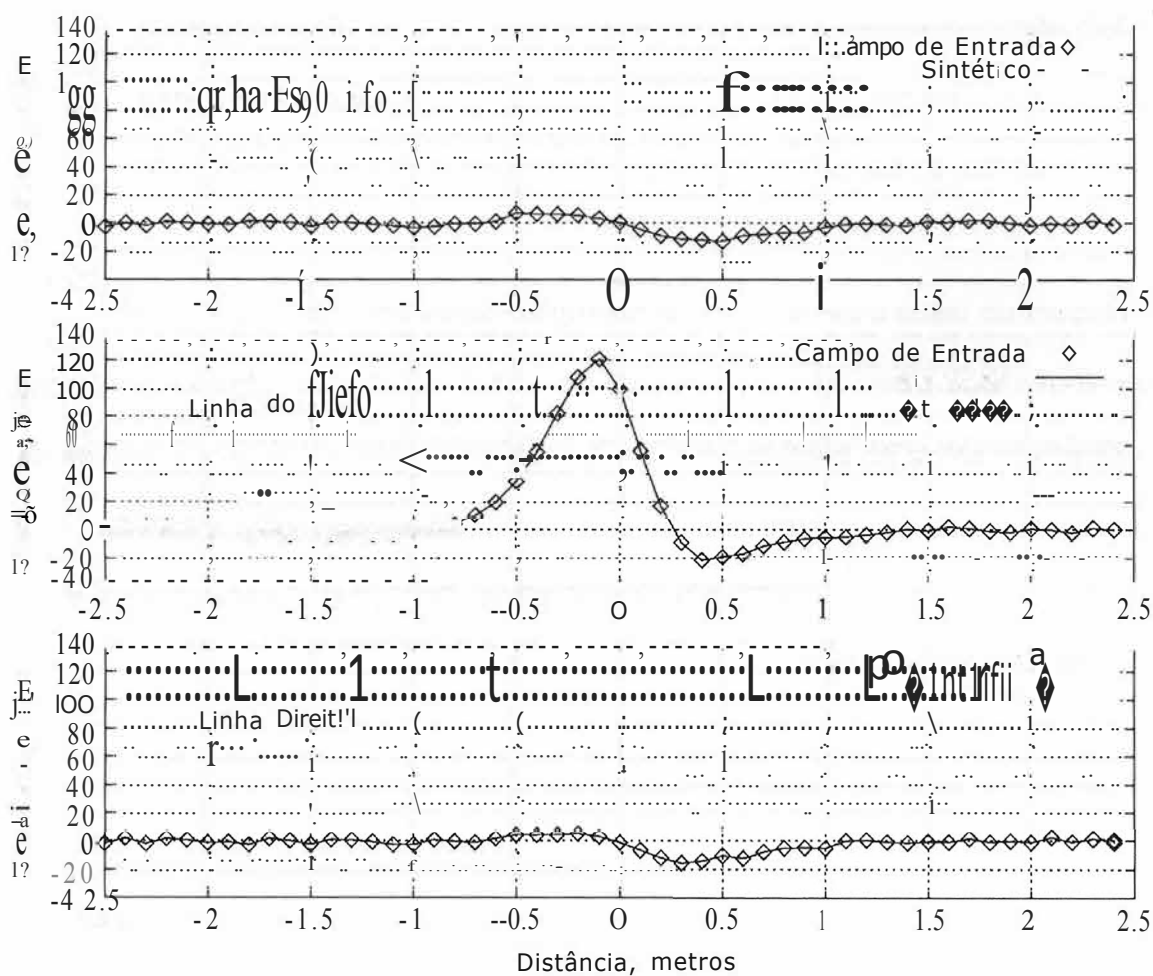


Figura 36 - Perfil do gradiente vertical.

- Magnitude do gradiente. O esquema imaginário que se segue (figura 34b), foi usado para obter os dados de seis sensores separados por uma distância de 0,5m e localizados ao longo dos eixos coordenados. Isto

permitiu a computação de três diferenças normalizadas que aproximaram o vetor gradiente a um ponto central comum. Então, esses valores foram utilizados para computar a magnitude do vetor gradiente usado na interpretação. Como no caso 3, a separação finita deve ser também considerada para a obtenção de resultados corretos. Como pode-se observar na figura 37, a curva para o gradiente não é simétrica. Este comportamento se deve a separação entre os sensores ser finita (0,5 m). para eliminar este comportamento seria necessário reduzir o espaçamento entre eles para 0,1 m ou menos, ou que não é possível na prática.

Nos casos 1-3, o momento magnético é um parâmetro linear do modelo. No caso do gradiente, entretanto, todos os modelos do parâmetro são não-lineares desde que a magnitude seja computada pela raiz quadrada da soma das raízes de cada componente do gradiente (rms). Isto requer tratamento especial devido à otimização não-linear não poder ser facilmente atribuída.

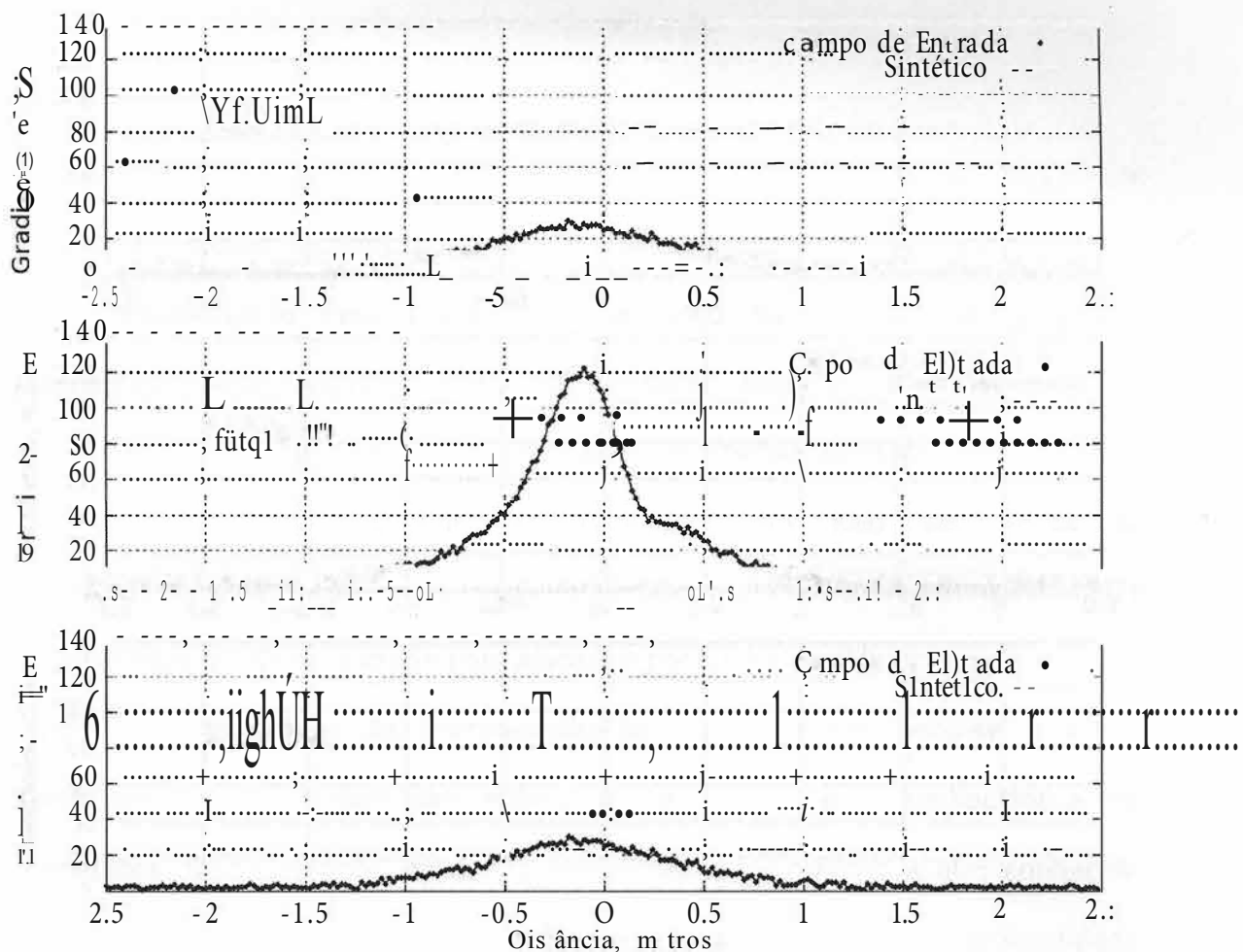


Figura 37 - valor absoluto do gradiente medido com separacao de 0,5 m.

Os resultados estimados são apresentados na tabela a seguir:

Tabela 2 - Parâmetros estimados para simulação numérica.

Tipo de campo	X (m)	y (m)	Z (m)	M.Magnético (cgs)
Campo total	0,01 ±0,02	- 0,01 ±0,01	0,5 ±0,005	49,8
Campo total (2 sensores)	0,01 ±0,02	- 0,01 ±0,01	0,5 ±0,005	49,8
Gradiente Vertical	0,01 ±0,01	0,0 ±0,004	0,51 ±0,004	50,2
Gradiente Absoluto	0,01 ±0,005	0,01 ±0,003	0,5 ±0,003	52,4

## 5.5 Medidas dos Campos de Gradiente

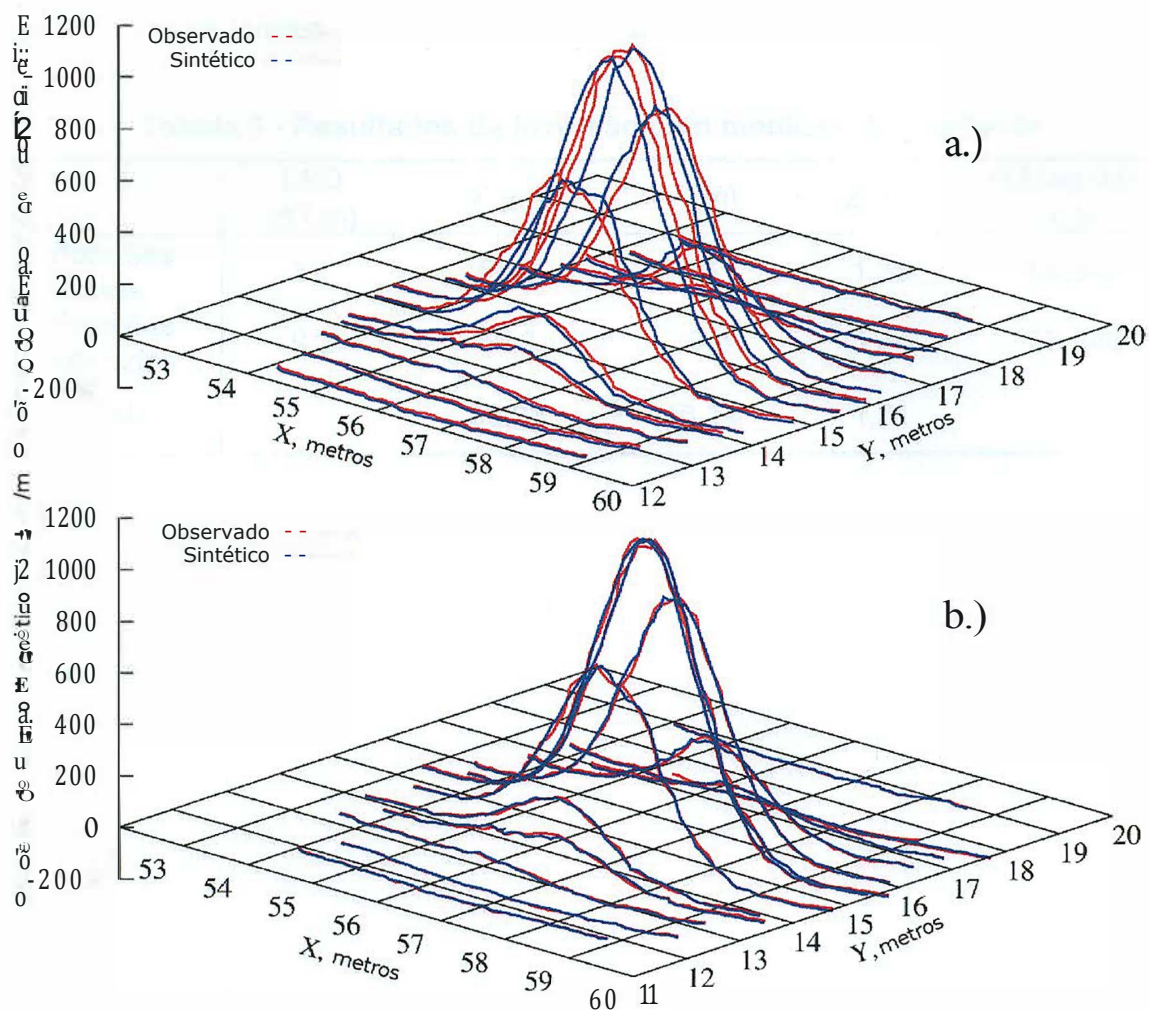
Em 2005, a empresa *Geometrics* e a NAVEODTECHDIV (Naval Explosive Ordnance Disposal Technology Division's) conduziram os primeiros estudos com o então recentemente desenvolvido sistema único de medição de gradientes magnéticos. Neste sistema células de sensores encontram-se separadas por aproximadamente 20 cm e são operadas independentemente com módulos eletrônicos idênticos. Durante as operações no sítio de testes da NAVEODTECHDIV, os dados do gradiente vertical foram obtidos e um receptor RTK GPS (Trimble 5700) foi utilizado para alocar os pontos de medida.

Durante a fase de interpretação dos experimentos, usou-se o *kit* de ferramentas da *Geometrics* para estimar a posição dos alvos conhecidos e não conhecidos. Primeiramente, os dados apresentados se referem a alvo conhecido, um projétil com 5 polegadas de diâmetro enterrado em pé a 1,42 m de profundidade. Os resultados da inversão estão apresentados na figura 38a.

Após este exemplo, uma nova função do *kit* pode ser demonstrada. Sabe-se que as posições contêm erros que afetam a interpretação final. Estes erros estão associados principalmente com os levantamentos marítimos, onde o reboque dos cabos introduz erros consideráveis e tornam impossíveis as coincidências de dados obtidos durante as passagens sobre ou próximas ao mesmo ponto. Como solução a esse problema, o kit oferece como recurso a "correção estática não-conhecida" nas coordenadas X, Y e Z para cada linha de perfil.

Como ilustração, aplicou-se esse método para a anomalia do projétil de 5 polegadas encontrado no sítio da NAVEODTECHDIV. Os resultados são mostrados na figura 10b. Os resultados apresentam um ajuste refinado entre a curva observada

e a curva sintética. Desvios de dados típicos necessários obterem-se ajuste razoáveis estão concentrados na faixa de 30 cm a 1,1 m.



**Figura 38 - Resultados de inversão para o gradiente vertical. a) Coordenadas XY constantes e b) coordenadas XY com desvios programados.**

A tabela 3 apresenta os resultados da inversão para ambos os métodos. A última linha da tabela contém valores de coordenadas estimados para o alvo obtidos a partir de medidas de eletromagnetismo (EM). Os dados de EM estático foram feitos com um grid de 5 x 5 com 0,5 m intervalo de grid diretamente centrados sobre o alvo. Estimativas para os parâmetros foram obtidas através do *software* para

inversão de EM desenvolvido pela Grimm em 2003 que assume que os alvos são dipolos infinitesimais caracterizados por um tensor de polarizabilidade anisotrópica. Ambas as estimativas de profundidade e momento magnético estão de acordo com os valores reais iniciais.

**Tabela 3 - Resultados da inversão com medidas de gradiente**

	LSQ (nT/m)	X (m)	Y (m)	Z (m)	M.Magnético (cgs)
Posições fixas	37	56,2	16	1,35	56,942
Posições Alteradas	9,2	56,3	15,8	1,34	53,946
EM		56,23	16,14	1,31	



## 5.6 Conclusões

O *kit* de inversão de dados magnéticos de código fonte aberto foi apresentado neste trabalho aos usuários. Ele permite inversões baseadas em modelos simples dipolares para uma variedade de campos físicos, como os campos magnéticos totais, gradientes e magnitude de gradiente. A estrutura pode lidar com múltiplos formatos de dados, tal como linhas de perfis e grids regulares. Pôde-se ilustrar a aplicação da estrutura com um exemplo numérico simples e com um campo real apresentando resultados satisfatórios entre os parâmetros reais e aqueles estimados pela inversão. Entretanto, para que o usuário possa usufruir das propriedades do *software* é necessária uma familiaridade com a linguagem de programação orientada a objetos C++.

## 6 Conclusões

O programa desenvolvido pelos autores possibilitou uma boa estimativa da localização dos alvos em todas as técnicas utilizadas. A precisão da medida melhorou significativamente quando a técnica utilizava medidas de gradiente, ainda que, medidas com detectores simples tenham apresentado resultados satisfatórios. Outro ponto importante dessa *suíte* de inversão é a facilidade que a estrutura previamente criada oferece no que tange a entrada de dados em diversos formatos: perfis, grids, modelagem dos alvos, etc.

Enquanto ferramenta de interpretação de dados magnéticos, a ferramenta, como declararam os autores no artigo, ainda não é um conjunto fechado e totalmente formalizado de soluções para a questão. Porém, o aspecto *open source*, juntamente com a facilidade de comunicação com ferramentas de outros desenvolvedores, torna o conjunto de ferramentas um forte candidato a ser encolhido pelos pesquisadores no futuro.

Baseando-se nos bons resultados obtidos com a ferramenta analisada e, tendo sido evidenciada a importância dos métodos magnéticos na descoberta e exploração de campos de petróleo, a expectativa é de que num futuro não muito distante os primeiros levantamentos magnéticos possam ser realizados na bacia de Salta, já que esta apresenta papel de destaque no cenário econômico no que tange o potencial de exploração petrolífero e que, curiosamente até os dias atuais não apresenta nenhum tipo sequer de dados magnéticos levantados.

Num futuro certamente próximo, com a melhoria nos algoritmos e implementações, a bacia de Salta poderá ser contemplada com simulações que ajudarão nos levantamentos magnéticos vindouros e, conseqüentemente, uma melhor interpretação dos dados já obtidos ou que ainda serão levantados.

## 7 Referencias Bibliográficas

- Bianucci, H. Acevedo, O. Cerdán, J. 1981. Evolución tectonosedimentaria del Grupo Salta en la Subcuenca Lamas de Olmedo (provincias de Salta y Formosa) Actas 8° Congreso Geológico Argentino, 3: 159-172. San Luis.
- Bianucci, H. & Homove, J.F., 1982. Tectogénesis de un sector de la cuenca del subgrupo Pirgua, Noroeste Argentino. 5° Congreso Latinoamericano de Geología, Actas 1: 539-546. Buenos Aires.
- Comínguez, A. & Ramos, V.A., 1995. Geometry and seismic expression of the Cretaceous Salta rift system, northwestern Argentina. In: Tankard, A.J., Suárez, S.R., Welsink, H.J. (Eds.), Petroleum Basins of South America. American Association of Petroleum Geologists Memoir 62: 325-340, Tulsa.
- del Papa, C.E. & Salfity, J.A., 1999. Non-marine Paleogene sequences, Salta Group, Northwest Argentina. Acta Geológica Hispánica, v. 34, n.2-3, 105-121.
- Disalvo, A. 2002. Cuenca del Noroeste: marco geológico y reseña histórica de la actividad petrolera. In: Schiuma, M., Hinterwimmer, G., Gustavo Vergani, G. (Eds.) Rocas Reservorio de las Cuencas Productivas de la Argentina. Cuenca del noroeste. V Congreso de Exploración y Desarrollo de Hidrocarburos - Integración, el gran desafío. Mar del Plata, Instituto Argentino del Petróleo y del Gas, Actas, pp.: 663-781.
- Disalvo, A., Schelotto, M.L.R., Gómez Omil, R., Hofmann, C., Benítez, J., Hurtado, S., 2002a. Los reservorios de la Formación Yacoraité. In: Schiuma, M., Hinterwimmer, G., Gustavo Vergani, G. (Eds.) Rocas Reservorio de las Cuencas Productivas de la Argentina. Cuenca del noroeste. V Congreso de Exploración y Desarrollo de Hidrocarburos - Integración, el gran desafío. Mar del Plata, Instituto Argentino del Petróleo y del Gas, Actas, pp.: 717-738.
- Disalvo, A., Hofmann, C., Luquez, J., Schelotto, M.L.R. 2002b. Los reservorios de las formaciones Palmar Largo y La Tigra. In: Schiuma, M., Hinterwimmer, G., Gustavo Vergani, G. (Eds.) Rocas Reservorio de las Cuencas Productivas de la Argentina. Cuenca del noroeste. V Congreso de Exploración y Desarrollo de Hidrocarburos - Integración, el gran desafío. Mar del Plata, Instituto Argentino del Petróleo y del Gas, Actas, pp.: 738-747.
- Disalvo, A., Sebastián, M., Muzzio, M.E., Hofmann, C., Arteaga, M. 2005. Trampas de hidrocarburos en el oeste de la Provincia de Formosa, Argentina. In: Kozlowski, E., Vergani, G., Boll, A. (Eds.) VI Congreso de Exploración y Desarrollo de Hidrocarburos - Las Trampas de Hidrocarburos en las Cuencas Productivas de Argentina. 15 al 19 de Noviembre de 2005. Mar del Plata. pp.: 73-88
- Galliski, M.A. & Viramonte, J.G., 1988. The Cretaceous paleorift in north-western Argentina: A petrologic approach. Journal of South American Earth Sciences, 1: 329-342.

- Gómez Omil, R.J., Boll, A., Hernández, R.M., 1989. Cuenca cretácico-terciaria Dei Noroeste argentino (Grupo Salta). In: Chebli, G.A. & Spalletti, L.A. (Eds.), Cuencas Sedimentarias Argentinas, Universidad Nacional de Tucumán, Serie de Correlación Geológica, 6: 43-64.
- Gómez Omil, R.J. & Boll, A., 1999. Sistema petrolero de la cuenca cretácica Dei noroeste argentino. In: IAPG, Reservoirio de las Cuencas Productivas de la Argentina. Cuenca dei noroeste. IV Congreso de Exploración y Desarrollo de Hidrocarburos. Mar dei Plata, Instituto Argentino dei Petróleo y dei Gas, Actas, pp.: 101-112.
- Gómez Omil, R.J. & Boll, A., 2005. Cuenca Cretácica dei Noroeste Argentino. In: Chebli, G.A., Cortinas, J.S., Spalletti, L.A., Legarreta, L., Vallejo, E.L. (Eds.) Frontera Exploratoria de la Argentina. VI Congreso de Exploración y Desarrollo de Hidrocarburos - Ampliando las Fronteras. 15 ai 19 de Noviembre de 2005. Mar dei Plata. pp.: 63-73
- Griffiths, D. J. Introduction to Electrodynamics, 3a edic. New Jersey:Prentice Hall, 1989, 562p, ISBN 0-13-805326-x.
- HALLIDAY, D.; RESNICK, R.; WALKER, J. Fundamentals of Physics. 6a ed. LTC-Livros Técnicos e Científicos Editora S.A., 2003, v.3, 281 p.
- Harding, T.P. 1984. Graben hydrocarbon occurrences and structural styles. American Association Petroleum Geologists Bulletin, 68(3): 333-364.
- Kozłowski, E., Vergani, G., Boll, A. 2005. Las Trampas de Hidrocarburos en las Cuencas Productivas de Argentina. In: Kozłowski, E., Vergani, G., Boll, A (Eds.) VI Congreso de Exploración y Desarrollo de Hidrocarburos - Ampliando las Fronteras. 15 ai 19 de Noviembre de 2005. Mar dei Plata. Pp.: 1-11
- Llambías, E.J., 1999. El magmatismo gondwánico durante el Paleozóico Superior-Triásico. Em: R. Caminos (Ed.): Geología Argentina, Lãs rocas ígneas gondwánicas. Anales dei Instituto de Geología y Recursos Minerales, 29 (14): 349-376. Buenos Aires.
- LUIZ, J. G.; SILVA, L. M. C. Geofísica de Prospecção. Ol.ed. Belém: Editora Universidade UFPA, 1995. v.1, 31 lp. ISBN 85-247-0118-8.
- Luquez, J. & Palma, M. 1998. Palmar Largo Field. Pluspetrol
- Megías, A.G., 1982. Introducción ai análisis tectosedimentario: aplicación ai estudio dinámico de cuencas. 5° Congreso Latinoamericano de Geología, Actas 1: 385-402. Buenos Aires.
- Méndez, V., Navarini, A., Plaza, D, Viera, O., 1972. Faja Eruptiva de la Puna oriental. 5° Congreso Geológico Argentino (Córdoba), Actas 4: 86-100, Buenos Aires.

- Milani, E.J. & Thomaz Filho, A., 2000. Sedimentary Basins of South America. In: Cordani, U.G., Milani, E.J., Thomaz Filho, A., Campos, D.A. (Eds.), Tectonic Evolution of South America. Rio de Janeiro, pp: 389-449.
- Moreno, J.M., 1970. Estratigrafía y paleogeografía del Cretácico Superior en la cuenca del norte argentino, con especial mención de los Subgrupos Balbuena y Santa Bárbara. Asociación Geológica Argentina, Revista 25 (1), 9-44.
- NUSSENZVEIG, H. M. Curso de Física Básica 1a. ed. - São Paulo: Edgar Blücher, 1997 v.3, ISBN: 85-212-0134-6
- PARASNIS, D. S. 1997 - Principles of Applied Geophysics, Chapman e Hall, London, 2a edic..
- Ramos, V.A., 1999. Rasgos estructurales del territorio argentino. In: Caminos, R., (Ed.), Geología de la República Argentina. Dirección Nacional del Servicio Geológico, Anales 29 (19).
- Reyes, F.C. & Salfity, J.A., 1973. Consideraciones sobre la estratigrafía del Cretácico (Subgrupo Pirgua) del noroeste argentino. Actas 5° Congreso Geológico Argentino, 3: 355-385. Carlos Paz
- Sabino, I.F., 2004. Estratigrafía de la Formación La Yesera (Cretácico): Base del relleno sinrift del Grupo Salta, noroeste argentino. Associação Geológica Argentina 59 (2), 330-340.
- Salfity, J.A. & Marquillas, R.A., 1989. El basamento precretácico de la Argentina septentrional y regiones adyacentes. Comunicaciones, 40: 17-28. Santiago.
- Salfity, J.A. & Marquillas, R.A., 1994. Tectonic and sedimentary evolution of the Cretaceous-Eocene Salta Group Basin, Argentina. In: Salfity, J.A. (Ed): Cretaceous Tectonics of the Andes, Braunschweig/Wiesbaden, Earth Evolution Sciences, Friedr. Vieweg & Sohn, p. 266-315.
- TELFORD, W. M.; GELDART, L. P. E SHERIFF, R. E. 1990 - Applied Geophysics, Cambridge University Press, 2a edic..
- TCHERNYCHEV, M., SNYDER, D.D. **Open source magnetic inversion programming framework and its practical applications.** Journal of Applied Geophysics. V. 61 184 - 193p. 2007.
- Turner, J.C.M., 1959. Estratigrafía del cordón de Escaya y de la sierra de Rinconada (Jujuy). Revista de la Asociación Geológica Argentina, 13 (1): 15-39.

Turner, J.C.M., 1964. Descripción Geológica de la Hoja 2b. La Quiaca (provincias de Jujuy). Instituto Nacional de Geología e Minería, Boletín 103, 118 pp. Buenos Aires.

UNIVERSIDADE FEDERAL DE SANTA MARIA. **Eletromagnetismo**. Santa Maria. Disponível em: <http://www.ufsm.br/gef/EletoOO.htm>. Acesso em:19.07.2007