

**ESTUDO DAS FEIÇÕES LINEARES OBSERVADAS EM  
DADOS AEROMAGNÉTICOS DA BACIA DO SOLIMÕES A  
PARTIR DE IMAGENS DIGITAIS DE SOMBREAMENTO  
DO RÉLEVO ANÔMALO TOTAL**

por

**ALEXANDRE DE OLIVEIRA AFFONSO**

Geólogo (Universidade Federal do Rio de Janeiro – 1989)

Tese submetida como requisito parcial ao grau de

**MESTRE EM CIÊNCIAS**

em

**GEOFÍSICA**

ao

Colegiado do Curso de Pós-Graduação em

Geofísica

da

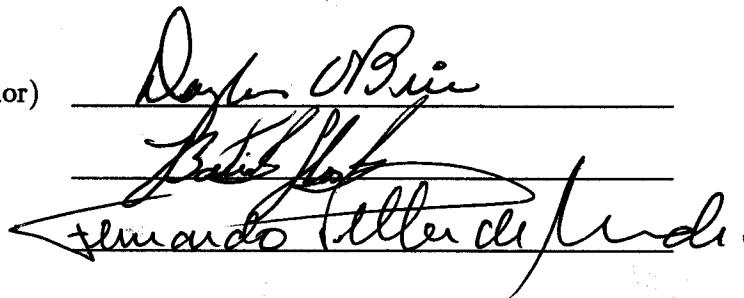
**UNIVERSIDADE FEDERAL DO PARÁ**

Banca Examinadora :

Dr. Douglas Patrick O'Brien (Orientador)

Dr. João Batista Sena Costa

Dr. Fernando Pellon de Miranda



Data da Homologação : 25/11/1991

T.377    **AFFONSO, Alexandre de Oliveira. Estudo das feições lineares observadas em dados eletromagnéticos da Bacia do Solimões a partir de imagens digitais de sombreamento do relevo anômalo total.** Belém: Universidade Federal do Pará. Centro de Geociências. Deptº de Geofísica, 1991. 109 p.  
A 257    **Tese (Mestrado em Geofísica) - Curso de Pós-Graduação em Geofísica, Centro de Geociências, UFPa., 1991.**

**1. BACIA DO SOLIMÕES - Dados Aeromagnéticos . 2. IMAGENS DIGITAIS. 3. LINEAMENTOS. I. TÍTULO.**

A minha familia, minha esposa Marisa e nossa filha Morgana.

## SUMÁRIO

Dedicatória .....	i
Sumário .....	ii
Lista de Ilustrações (Tabelas) .....	iv
Lista de Ilustrações (Figuras) .....	iv
Resumo .....	1
Abstract .....	3
CAPÍTULO 1. Introdução .....	5
CAPÍTULO 2. Características sedimentares e tectônicas da Bacia do Solimões .....	7
2.1 Estratigrafia .....	8
2.2 Modelos Estruturais Propostos .....	10
2.3 Magmatismo Básico .....	12
CAPÍTULO 3. Aspectos gerais dos dados aeromagnéticos utilizados .....	13
CAPÍTULO 4. Interpretação qualitativa das feições lineares observadas nos dados aeromagnéticos com base nos mapas de contorno .....	15
CAPÍTULO 5. Interpretação dos diferentes padrões de feições lineares magnéticas observados nos dados aeromagnéticos utilizando imagens digitais de sombreado .....	18
5.1 Considerações Teóricas .....	19
5.2 Aplicação do Método das Imagens .....	21
5.3 Descrição das Imagens .....	22
CAPÍTULO 6. Integração dos aspectos observados nas imagens digitais com os conceitos associados a zonas e cinturões de cisalhamentos e suas implicações no contexto tectônico evolutivo da Bacia do Solimões .....	30



<b>CAPÍTULO 7. Suporte quantitativo para a interpretação do padrão de feições lineares observadas nas imagens digitais .....</b>	<b>37</b>
<b>7.1 Modelamento Bidimensional .....</b>	<b>37</b>
7.1.1 Modelo 1 .....	40
7.1.2 Modelo 2 .....	41
7.2 Utilização dos Conceitos de Cross-Covariância na Identificação de 'Offsets' Associados aos Lineamentos Magnéticos .....	42
<b>CAPÍTULO 8. Integração da interpretação do padrão estabelecido pelas feições lineares magnéticas com o processo evolutivo da Bacia do Solimões .....</b>	<b>45</b>
8.1 Evolução Estrutural da Amazônia .....	45
8.2 Relações com as Feições Lineares Magnéticas .....	47
<b>CAPÍTULO 9. Conclusões .....</b>	<b>51</b>
<b>Agradecimentos .....</b>	<b>52</b>
<b>Referências Bibliográficas .....</b>	<b>53</b>

## LISTA DE ILUSTRAÇÕES

### TABELAS

Tab.1 – Especificações técnicas dos aerolevantamentos utilizados .....	14
--	----

### FIGURAS

Figura 1 – Localização da área estudada na Bacia do Solimões, e os principais elementos tectônicos da Região Amazônica. ....	58
Figura 2 – Principais feições morfo-estruturais da Bacia do Solimões .....	58
Figura 3 – Carta litoestratigráfica da Bacia do Solimões. ....	59
Figura 4 – O Megacisalhamento do Solimões mapeado através de levantamentos sísmicos, e a localização dos projetos aeromagnéticos utilizados. ....	60
Figura 5 – Mapa de contorno do campo magnético anômalo referente ao projeto Jutai. 61	
Figura 6 – Mapa de contorno do campo magnético anômalo referente ao projeto Carauari Sul. ....	62
Figura 7 – Mapa de contorno do campo magnético anômalo referente ao Projeto Carauari Norte. ....	63
Figura 8 – Mapa de contorno do campo magnético anômalo referente ao projeto Coari Oeste. ....	64
Figura 9 – Mapa de contorno do campo magnético anômalo referente ao Projeto Coari Leste. ....	65
Figura 10 – Perfil magnético N-S localizado no projeto Carauari Norte mostrando regiões caracterizadas por uma predominância de fontes de alta frequência associadas a altos magnéticos regionais em contraste com regiões onde estas fontes de alta frequência estão relativamente ausentes e associadas a baixos magnéticos regionais. ....	66

Figura 11 – Perfil N–S do campo magnético observado versus campos magnéticos calculados a partir de filtragens de continuação para cima. ....	67
Figura 12 – Campo magnético de um prisma em baixas latitudes .....	68
Figura 13 – Campo potencial $F(x, y)$ representado por uma componente vertical de um sistema de coordenadas cartesianas .....	69
Figura 14 – Elemento superficial do campo potencial $F(x, y)$ mostrando a geometria e nomenclatura associada ao método de imagens digitais de sombreamento .....	69
Figura 15 – Imagem digital de relevo sombreado do Projeto Jutuí gerada a partir de iluminação artificial orientada na direção N50°W, 45° de elevação e 7 % de saturação. ....	70
Figura 16 – Imagem digital de relevo sombreado do Projeto Jutuí gerada a partir de iluminação artificial orientada na direção N45°E, 45° de elevação e 8 % de saturação. ....	71
Figura 17 – Imagem digital do Projeto Jutuí gerada a partir de iluminação artificial orientada na direção N–S, 45° de elevação, e 8% de saturação. ....	71
Figura 18 – Imagem digital do Projeto Carauari Sul gerada a partir de iluminação artificial orientada na direção N50°W, 45° de elevação, e 9% de saturação. ....	73
Figura 19 – Imagem digital de relevo sombreado do Projeto Carauari Sul gerada a partir de iluminação artificial orientada na direção N45°E, 45° de elevação, e 7% de saturação. ....	74
Figura 20 – Imagem digital de relevo sombreado do Projeto Carauari Sul gerada a partir de iluminação artificial orientada na direção N–S, 45° de elevação, e 9% de saturação. ....	75
Figura 21 – Imagem digital de relevo sombreado do Projeto Carauari Norte gerada a partir de iluminação artificial orientada na direção N45°E, 45° de elevação, e 8% de saturação. ...	76
Figura 22 – Imagem digital de relevo sombreado do Projeto Carauari Norte gerada a partir de iluminação artificial orientada na direção N50°W, 45° de elevação, e 9% de saturação. ..	77
Figura 23 – Imagem digital de relevo sombreado do Projeto Carauari Norte gerada a partir de iluminação artificial orientada na direção N–S, 45° de elevação, e 9% de saturação. ....	78

Figura 24 – Imagem digital de relevo sombreado do Projeto Coari Oeste gerada a partir de iluminação artificial orientada na direção N60°W, 45° de elevação, e 10% de saturação. .	79
Figura 25 – Imagem digital de relevo sombreado do Projeto Coari Oeste gerada a partir de iluminação artificial orientada na direção N45°E, 45° de elevação e 9% de saturação. ...	80
Figura 26 – Imagem digital de relevo sombreado do Projeto Coari Oeste gerada a partir de iluminação artificial orientada na direção N–S, 45° de elevação e 7% de saturação. ....	81
Figura 27 – Imagem digital de relevo sombreado do Projeto Coari Leste gerada a partir de iluminação artificial orientada na direção N60°W, 45° de elevação, 10% de saturação. ..	82
Figura 28 – Imagem digital de relevo sombreado do Projeto Coari Leste gerada a partir de iluminação artificial orientada na direção N45°E, 45° de elevação, e 6% de saturação .....	83
Figura 29 – Imagem digital de relevo sombreado do Projeto Coari Leste gerada a partir de iluminação artificial orientada na direção N–S, 45° de elevação, e 9% de saturação. ....	84
Figura 30 – Feições estruturais associadas a um sistema transcorrente dextral. ....	85
Figura 31 – Feições estruturais associadas ao recobrimento lateral entre zonas transcorrentes adjacentes. ....	86
Figura 32 – Esquema de desenvolvimento de duplexes em zonas de arqueamento, considerando zonas de cisalhamento dextrais. ....	87
Figura 33 – Esquema de desenvolvimento de duplexes em zonas de recobrimento. ....	87
Figura 34 – Esquema de acomodação dos deslocamentos transcorrentes. ....	88
Figura 35 – Esquema de formação dos duplexes de Riedel. ....	89
Figura 36 – Associação do padrão geral estabelecido pelos lineamentos magnéticos observados nas imagens digitais, e estruturas tectônicas de ejeção formadas a partir de um regime transpressivo associado ao recobrimento lateral entre zonas transcorrentes dextrais .....	90
Figura 37 – Associação de padrões magnéticos observados nas imagens digitais, com estruturas geológicas lineares que sugerem a presença de estruturas em flor negativas e positivas. ..	91

Figura 38 – Lineamentos geológicos principais presentes no Craton Amazônico. ....	92
Figura 39 – Sistema de coordenadas X–Z de uma seção transversal a um corpo poligonal de vértices 1–2–3–4. ....	93
Figura 40 – Modelo bidimensional, que simula um falhamento que desloca verticalmente níveis de soleiras e o embasamento, mostrando que um baixo magnético estará associado ao bloco soerguido. ....	94
Figura 41 – Modelo bidimensional simulando um falhamento que desloca verticalmente níveis de soleiras e o embasamento, mostrando neste caso que a ausência de um nível de soleira acima do bloco soerguido promove a presença de um alto magnético sobre esta região. ....	95
Figura 42 – Modelo bidimensional mostrando uma variante do modelo da figura 41. Neste caso, além da ausência de um nível de soleira, o plano de falha promove um contato lateral entre dois níveis diferentes de soleiras, o que conseqüentemente dará origem a um alto magnético sobre o bloco soerguido. ....	96
Figura 43 – Modelo 1, baseado na superposição de formas bidimensionais de prismas bidimensio- nais, mostrando uma interpretação possível para a presença de altos magnéticos associados a regiões onde há um predomínio de fontes de alta frequência. ....	97
Figura 44 – Modelo 2, baseado na superposição de prismas bidimensionais, evidenciando a presença de uma superposição de fontes profundas intraembasamento e fontes rasas associadas a níveis de diabásio. ....	98
Figura 45 – Metodologia adotada para analisar a presença de 'offsets' nos lineamentos magnéticos através dos conceitos de cross-covariância. ....	99
Figura 46 – Constatação, através dos conceitos de cross-covariância, da presença de um 'offset' dextral, associado aos lineamentos magnéticos NE–SW presentes numa sub-área do Projeto Carauari Sul. ....	100
Figura 47 – Representação gráfica dos valores da cross-covariância, obtidos entre os perfis corre- lacionados referentes a sub-área do Projeto Carauari Sul (figura 46) ....	101

Figura 48 – Constatação, através dos conceitos de cross-covariância, da presença de um 'offset' dextral, associado aos lineamentos magnéticos NE-SW, que limitam as regiões caracterizadas pela predominância relativa de fontes de alta e baixa frequência numa sub-área do Projeto Jutai. ....	102
Figura 49 – Representação gráfica dos valores da cross-covariância, obtidos entre os perfis correlacionados referentes a sub-área do Projeto Jutai .....	103
Figura 50 – Compartimentação arqueana, mostrando os núcleos de terrenos granito-'greenstones' separados por descontinuidades crustais. ....	104
Figura 51 – Arcabouço tectono-estrutural do Proterozóico Médio. ....	105
Figura 52 – Arcabouço tectônico-estrutural do Paleozóico (Costa e Hasui, 1991). ....	106
Figura 53 – Arcabouço tectono-estrutural do Mesozóico. ....	107
Figura 54 – Arcabouço tectono-estrutural do Terciário Inferior Médio (Paleoceno - Oligoceno) .....	108
Figura 55 – Arcabouço tectono-estrutural Terciário Superior. ....	109

# ESTUDO DAS FEIÇÕES LINEARES OBSERVADAS EM DADOS AEROMAGNÉTICOS-DA BACIA DO SOLIMÕES A PARTIR DE IMAGENS DIGITAIS DE SOMBREAMENTO DO RELEVO ANÔMALO TOTAL

(TESE DE MESTRADO : Nov./91)

ALEXANDRE DE OLIVEIRA AFFONSO

Orientador : Dr. Douglas Patrick O'Brien

*Departamento de Geofísica – Centro de Geociências/UFPa*

*Caixa Postal 309 – Belém, PA, Brasil*

## RESUMO

A Bacia do Solimões é caracterizada por um padrão magnético complexo, expresso ao longo de toda sua extensão, e produzido pela superposição de anomalias magnéticas que se apresentam sob a forma de feições lineares. Tais feições refletem as diferentes atividades tectônicas que atuaram na Região Amazônica através do Pré-Cambriano e Fanerozóico.

Neste trabalho, foi aplicado nos dados aeromagnéticos da Bacia do Solimões um método de processamento de imagens digitais de sombreamento do relevo magnético anômalo total que, dadas suas características metodológicas, permitindo utilizá-lo como um filtro direcional, possibilitou a definição de aspectos relevantes no contexto das relações entre os lineamentos magnéticos E/W, NE/SW, e NW/SE.

Nesse sentido, foram identificados padrões de lineamentos magnéticos que refletem a existência de zonas de cisalhamento transcorrentes dextrais, orientadas preferencialmente na direção E/W. A interação entre os diversos segmentos transcorrentes promoveu o desenvolvimento de um regime predominantemente transpressivo, representado por falhas reversas associadas aos lineamentos magnéticos E/W e NE/SW; e duplexes direcionais formando falhas em flor positivas e negativas associadas, respectivamente, aos lineamentos magnéticos orientados na direção N70–80E e N70–80W.

A análise quantitativa permitiu explicar dois aspectos importantes em relação às feições lineares observadas nas imagens digitais.

O primeiro mostra, através de modelamentos baseados na superposição de prismas bidimensionais, que estas feições lineares magnéticas podem ser explicadas pela superposição de fontes

profundas intraembasamento altamente magnéticas, e fontes rasas de alta frequência, sendo estas associadas a falhas reversas ao longo dos níveis de diabásio, presentes em forma de intrusões nos sedimentos paleozóicos da Bacia do Solimões.

O segundo aspecto, baseado na utilização dos conceitos da cross-covariância, constata a presença de 'offsets' dextrais, associados aos lineamentos magnéticos NE-SW, ao longo da direção E-W. Este fato mostra, quantitativamente, que o padrão magnético desta região pode ser explicado pela presença de zonas de cisalhamento transcorrentes dextrais, cujos processos tectônicos associados foram fortemente condicionados por zonas de fraquezas pré-existentes (Pré-Cambrianas, Paleozóicas) durante o Mesozóico e Cenozóico.



# STUDY OF THE LINEAR FEATURES OBSERVED IN AEROMAGNETIC DATA FROM THE SOLIMÕES BASIN THROUGH SHADED RELIEF IMAGERY

(MASTER THESIS : Nov./91)

ALEXANDRE DE OLIVEIRA AFFONSO

Adviser : Dr. Douglas Patrick O'Brien

*Departamento de Geofísica – Centro de Geociências/UFPA*

*Caixa Postal 309 – Belém, PA, Brazil*

## ABSTRACT

The Solimões Basin is a magnetically complex basin characterized by a superposition of different linear magnetic anomalies. These anomalies reflect the different tectonic episodes that have occurred in the Amazon Region during the Precambrian and Phanerozoic.

In this work, a shaded relief method of digital image processing was applied to the aeromagnetic data from the Solimões Basin. The characteristics of this method, which allow its use as a strike enhancement filter, clarified important aspects of the relationships between magnetic lineations oriented E–W, NE–SW, e NW–SE.

A magnetic lineation pattern was identified which reflects the presence of dextral strike–slip fault zones that have a preferential orientation in the E–W direction. The interaction between these systems promoted the development of a convergent stress regime which caused the formation of reversel faults associated with E–W and NE–SW magnetic lineaments; together with directional duplexes, forming positive and negative flower structures associated with N70–80E and N70–80W magnetic lineaments.

A parallel quantitative analysis was also performed on the aeromagnetic data which attempts to quantify two important aspects of these linear magnetic anomalies shown on the digital images.

The first analysis was based on a forward modeling of the aeromagnetic data using a superposition of two–dimensional prismatic bodies. It is shown that these magnetic linear features can be explained by the superposition of highly magnetized basement sources and higher frequency shallow sources associated with reverse faulting of diabase sill's present in the Paleozoic sediments

of the Basin.

The second analysis, which was based on cross-covariance methods, calculated the offsets present in the NE-SW magnetic lineaments along dextral E-W directions. This analysis supports the explanation that the magnetic pattern from this region can be explained by means of lateral offsets presumably along pre-existing zones of weakness (Precambrian, Paleozoic), during the Mesozoic and Cenozoic.

## CAPÍTULO 1

### INTRODUÇÃO

Os dados do campo magnético anômalo total, vinculados aos projetos aeromagnéticos da Bacia do Solimões, compõem um padrão de feições lineares magnéticas proeminentes. A interação e superposição entre as diferentes direções associadas a essas feições lineares, somadas às restrições impostas pelos baixos ângulos da inclinação e declinação do campo magnético desta região, que consistem em uma característica de áreas situadas em baixas latitudes, induzem grande complexidade dificultando a análise geofísica detalhada dessas feições, com base em dados do campo potencial magnético desta bacia.

Com a intenção de buscar uma melhor compreensão das anomalias magnéticas em termos geofísicos e geotectônicos, procurou-se, na presente tese, estudar o padrão estabelecido pelas feições lineares através da caracterização das anomalias magnéticas quanto à sua forma, direção estrutural e tipo de fontes associadas.

Este estudo foi realizado em escala regional, integrando informações de vários projetos aeromagnéticos realizados na Bacia do Solimões, através da aplicação da técnica de processamento de imagens digitais de sombreamento de relevo ( 'shaded relief'), no campo magnético anômalo total associados a estes projetos. Esta metodologia tem sido utilizada por vários autores quando se objetiva uma melhor interpretação qualitativa dos dados, se comparados com mapas de contorno do campo anômalo convencionais (Horn e Bachman, 1978; Guinness et al., 1983; Dods et al., 1985; Kowalik e Glenn, 1987; Broome, 1990; Machado, 1990).

O método das imagens de relevo sombreado gera imagens digitais a partir da representação dos dados utilizados em forma de uma superfície topográfica, que posteriormente é iluminada por uma fonte artificial, permitindo realçar o relevo topográfico associado ao campo anômalo. Portanto, esse método consiste, essencialmente, em calcular a intensidade de luz refletida em um ponto de observação, quando a fonte de luz encontra-se em uma dada posição distante em relação a um ponto superficial do relevo topográfico.

Dadas as particularidades do método, que permite iluminar a superfície associada ao campo anômalo em qualquer direção e aplicar um exagero vertical no relevo anômalo representado por esta

superfície topográfica, ele se comporta como um filtro direcional, possibilitando eliminar ou atenuar a presença de feições lineares paralelas à direção de iluminação, evidenciando, conseqüentemente, lineamentos transversais à direção de iluminação, os quais não são observados com nitidez nos mapas de contorno.

O método das imagens digitais de sombreamento consiste em uma ferramenta importante para uma interpretação de cunho qualitativo, porém deve ser observado que a resolução deste método, está associada ao tipo de detalhe que os dados utilizados podem fornecer. Neste trabalho, portanto, a resolução deste método será proporcional à resolução do método magnético que, por sua vez, estará vinculado às características dos levantamentos aeromagnéticos utilizados.

Deve ficar claro que o método magnético nesta região reflete as propriedades físicas associadas a diferentes distribuições de magnetização, provocadas pela presença de contrastes laterais de susceptibilidade magnética em corpos situados em subsuperfície, e que, neste trabalho, será analisada a possibilidade de correlacionar estas propriedades físicas com informações geológicas a priori, que fazem parte do contexto tectônico da Bacia do Solimões.

Na fase final deste trabalho, será avaliada, quantitativamente, a possibilidade de considerar fisicamente os modelos geológicos interpretados através das imagens digitais, como responsáveis pelo padrão magnético de feições lineares observadas nos dados aeromagnéticos desta região. Com esta finalidade, serão realizados modelamentos bidimensionais com base na superposição de prismas, simulando a presença de fontes rasas e profundas. Um outro aspecto que será abordado, através dos conceitos de cross-covariância, é a presença de 'offsets' nestes lineamentos magnéticos, e que podem ser interpretados como possíveis deslocamentos horizontais das fontes, provocados por falhas direcionais.

## CAPÍTULO 2

### CARACTERÍSTICAS SEDIMENTARES E TECTÔNICAS DA BACIA DO SOLIMÕES

A Bacia do Solimões (Caputo, 1984), anteriormente denominada de Bacia do Alto Amazonas, situada entre os paralelos 2° e 8° S e os meridianos 62° e 72° W, corresponde à porção mais ocidental da planície amazônica brasileira abrangendo uma área de aproximadamente 600.000 Km<sup>2</sup>.

Os limites desta bacia sedimentar (Fig. 1) são representados ao norte pelo Escudo das Guianas e ao sul pelo Escudo Brasil Central. A leste é limitada pelo Arco de Purus, e a oeste pelo Arco de Iquitos, que a separa, respectivamente, das bacias do Amazonas e do Acre.

Com relação aos escudos pré-cambrianos, Cordani et al. (1983) consideraram que os escudos das Guianas e Brasileiro encontram-se compartimentados em quatro províncias geotectônicas, que apresentam continuidade por sob as bacias do Solimões e Amazonas. Nesse sentido, a Bacia do Solimões encontra-se sobreposta às províncias Rio Negro-Juruena e Cinturão Rondoniense que lhe conferiram quatro feições geomorfológicas principais (Fig. 2), que exerceram um papel preponderante na montagem do arcabouço estratigráfico e no estabelecimento do quadro estrutural atual. Estas províncias são:

Sub-bacia do Juruá – Encontra-se sobreposta à província Rio Negro-Juruena, apresentando uma forma ovalada com eixo deposicional na direção NE-SW. É limitada a leste pelo Arco de Purus e a oeste pelo Alto de Carauari que a separa da Sub-bacia do Jandiatuba.

Sub-bacia do Jandiatuba – Encontra-se sobreposta ao Cinturão Rondoniense, com orientação principal E-W, sendo limitada a oeste pelo Arco de Iquitos.

Alto de Carauari – Constitui-se em um alto estrutural intrabacia de orientação NW-SE e com 120 Km de largura. Representa a zona de sutura entre a Província Rio Negro-Juruena e o Cinturão Rondoniense (Porshe, 1985). Este alto estrutural exerceu forte controle na sedimentação ordoviciano, devoniano e, com menor intensidade, na permocarbonífera. Ele divide a Bacia do Solimões nas sub-bacias do Juruá e Jandiatuba.

Arco de Purus – Representa o divisor geológico entre as bacias do Solimões e Amazonas, até o início do permo-carbonífero quando a sedimentação foi contínua nas duas bacias.

## 2.1 Estratigrafia

Caputo e Silva (1990), dividem a sedimentação na Bacia do Solimões em sete sequências (Fig. 3), cujos processos deposicionais estão associados a grandes ciclos de elevação e queda relativa do nível do mar. Segundo Silva (1988), apenas as quatro primeiras sequências deposicionais estão restritas ao Paleozóico, onde foram verificadas condições marinhas registradas na história geológica da bacia, caracterizada por ingressões com direção sempre de oeste para leste.

Sequência 1 – É representada pela Formação Benjamin Constant, que é composta por arenitos e folhelhos marinhos do Ordoviciano inferior (Aregiano/Lanviriano) restritos à Sub-bacia do Jandiatuba e correlacionáveis em tempo aos sedimentos da Formação Contaya da Bacia de Ucayali (Quadros, 1988). Após a sedimentação desta sequência, observa-se uma fase erosiva associada a um hiato deposicional de aproximadamente 100 Ma.

Sequência 2 – Esta sequência inicia-se durante o Ensiano com um processo deposicional ainda restrito à Sub-bacia do Jandiatuba, representado pela sedimentação marinha de offshore do folhelho que compõe a Formação Jandiatuba, e da porção inferior da Formação Biá de origem litorânea, sendo composta por arenitos grossos a conglomeráticos intercalados com siltitos micromicáceos e folhelhos. O processo de subida relativa do nível do mar ocorreu através de pulsos transgressivo-regressivos até o Frasniano, quando se iniciou a sedimentação sobre o Alto de Carauari e na Sub-bacia do Juruá dos sedimentos silicosos da Formação Uerê, que representa a unidade sedimentar que melhor reflete o controle sedimentar exercido pelo Alto de Carauari (Silva, 1987). A fase glacial que se seguiu é representada pelos tilitos da Formação Jaraqui do Mesofameniano, depositados em condições glaciomarinhas na Sub-bacia do Juruá e na porção sul do flanco oeste do Alto de Carauari. No final do ciclo Devoniano, uma fase regressiva é marcada por progradações fluviodeltaicas, com retrabalhamento eólico, representada pela porção inferior da Formação Juruá composta essencialmente por arenitos, com folhelhos e siltitos subordinados, que se interdigitam em direção à Sub-bacia do Jandiatuba, com os folhelhos regressivos da Formação Jandiatuba (Silva, 1987).

Sequência 3 – Representa a fase de continentalização parcial da Bacia do Solimões, caracterizada pela instalação de um processo de desertificação durante a sedimentação da porção superior da Formação Juruá. Este deserto expandiu-se durante o carbonífero, em 'onlap' na direção das bordas, gerando discordâncias nas margens da bacia, inclusive no Arco de Purus. A Formação Carauari, composta por uma espessa seção carbonático-evaporítica, representa o retorno da Bacia do Solimões às condições de sedimentação marinha, sendo que apenas os duzentos metros iniciais desta unidade estão restritos a esta bacia (Szatmari et al., 1975; Silva, 1987). A partir desta sedimentação inicial, a sedimentação passou a ser contínua nas bacias do Solimões e Amazonas. A Formação Carauari também apresenta um caráter em 'onlap' em direção às bordas, com transgressões amplas e deposição de sedimentos em áreas até então não alcançadas da bacia. A fase regressiva do final desta sequência foi marcada pelo aumento de clásticos pelíticos avermelhados (Silva, 1987 – ciclos V e VI).

Sequência 4 – Esta sequência representa a fase de continentalização total da bacia, caracterizada pela sedimentação dos 'red beds' da Formação Fonte Boa, composta, essencialmente, por siltitos, folhelhos, arenitos avermelhados e por discretos pacotes de anidrita e carbonatos associados. Estes sedimentos fecham o ciclo sedimentar paleozóico da Bacia do Solimões (Silva, 1988) e estão em grande parte erodidos, ficando restritos às porções centrais das Sub-bacias do Juruá e Jandiatuba. Esta unidade é correlacionável à Formação Andirá (Szatmari et al., 1975), e assumida como permiana.

Sequência 5 – Está reservada apenas na porção sul da Sub-bacia do Jandiatuba, em um 'inlier' de sedimentos mais antigos que o Cretáceo. É composta por sedimentos correlacionáveis à Formação Juruá Mirim e datada em relação ao vulcanismo básico da Bacia do Acre, como Neotriássico.

Sequências 6 e 7 – São representadas, respectivamente, pelas sedimentações eocretácica e terciária das formações Alter do Chão e Solimões. No Juro-Triássico, a bacia sofreu intenso magmatismo básico, ocorrendo a intrusão de soleiras na seção paleozóica.

## 2.2 Modelos Estruturais Propostos

Os primeiros dados sobre a Bacia do Solimões remontam ao final da década de 50, quando a PETROBRAS realizou a perfuração de poços estratigráficos ao longo dos principais rios da região. As dificuldades operacionais e a má resposta aos métodos sísmicos ocasionaram o abandono temporário das pesquisas na região até o ano de 1975, quando o avanço tecnológico da sísmica de reflexão, aliado à evolução dos meios de comunicação e transporte, permitiram a retomada do processo exploratório nesta região. Desta forma, Szatmari et al. (1975) concluíram que na Bacia do Solimões havia a presença de duas feições estruturais proeminentes: o Alto de Jutai e o Baixo do Juruá, resultantes da movimentação originada pela Orogenia Hercianina Tardia (Permiano Médio) de atuação nítida na região Oeste, faixa Andina. Esta análise resultou num programa sísmico de reconhecimento, que detectou uma anomalia estrutural correspondente à porção Leste do 'trend' do Juruá. Em 1976, Schneider e Carneiro concluíram que as estruturas recém-mapeadas na bacia poderiam ser originadas por esforços compressivos relacionados à Orogenia Andina (Cretáceo-Terciário).

Em 1981, Szatmari, estudando as fases orogênicas na evolução da Cordilheira dos Andes, voltou a relacionar a estruturação do 'trend' do Juruá com a Orogenia Tardiherciniana, atuante durante o Permo-Carbonífero. A Bacia do Solimões teria sofrido esforços de compressão resultantes da subducção da placa do Oceano Pacífico. A estruturação era resultante do empurrão do alto granítico raso de Iquitos para leste, contra a sequência sedimentar paleozóica da calha amazônica.

Segundo Esteves (1982), durante o Jurássico, a litosfera provavelmente teria se rompido ao longo da junção entre o continente Sul-Americano e a bacia oceânica do Pacífico, formando a placa oceânica de Nazca e iniciando o processo de subducção sob a borda noroeste da América do Sul. Com o surgimento desta margem convergente, teria se formado o 'trend' estrutural do Juruá como resultado de esforços compressionais.

Szatmari (1983, 1984) reformulou e ampliou seu modelo proposto anteriormente, considerando a existência de uma falha estendendo-se desde o Gráben do Tacutu até Pizco (Peru), que teria se desenvolvido no Triássico e Jurássico, quando da abertura do Golfo do México e Oceano Atlântico Norte. O bloco noroeste dessa falha teria se deslocado para sudoeste, durante a abertura do Golfo do México. A movimentação do bloco noroeste dessa falha sinistrógira teria sido acom-



panhada por pequena rotação anti-horária do bloco deslocado, provocando distensão no Gráben do Tacutu e compressão na região do Juruá. A intensidade dessa compressão seria crescente de nordeste para sudoeste.

Esteves (1984) reformulou o modelo de compressão, proposto anteriormente, concluindo que os esforços compressivos de direção NW-SE atuantes no Mesojurássico-Neojurássico e Eocretáceo, determinaram a formação e individualização das placas do Caribe, Cocos e Nazca. Os dobramentos do Juruá, de direção NE-SW, possivelmente resultariam destes esforços compressivos. A expansão das cadeias mesoceânicas da América Central e Pacífico Sul teria papel destacado na geração dos esforços compressivos atuantes na Bacia do Solimões, que seriam responsáveis pela formação do 'trend' do Juruá.

Em 1984, Caputo propôs um modelo no qual as estruturas da Bacia do Solimões resultariam de esforços compressivos atuantes no Neojurássico-Eocretáceo. O mesmo autor, em 1985, apresentou uma interpretação alternativa envolvendo transpressão. Segundo este autor, o alinhamento estrutural do Juruá teria se formado devido à colisão da borda NW do continente Sul-Americano com um arco de ilhas, durante a abertura do Atlântico Sul, o que teria originado esforços compressivos que alcançaram grandes distâncias dentro do continente Sul-Americano. Estes esforços teriam produzido um sistema dextrógiro de falhas com inúmeras dobras e falhas reversas. A estruturação teria ocorrido após o magmatismo básico distensivo do fim do Jurássico e antes da deposição da Formação Alter do Chão (Aptiano ao Turoniano).

Porshe (1985) conclui que um modelo estrutural que considera um processo de transcorrência com sentido de deslocamento dextral, acompanhada de uma componente de compressão, é o que melhor explica as feições estruturais observadas no 'trend' do Juruá, no qual três tipos de falhas foram identificadas como: falhas reversas perpendiculares à direção do esforço principal máximo, falhas reversas paralelas à direção de transcorrência e falhas sintéticas ligeiramente oblíquas à transcorrência. Este autor afirma que a estruturação do Juruá está ligada ao mesmo evento tectônico que originou as falhas reversas da Bacia do Acre e das bacias subandinas do Peru, que afetam a Sequência Permo-Triássica e são recobertas discordantemente pelos sedimentos do Cretáceo.

Caputo e Silva (1990), com base em Caputo (1985), denominaram a zona principal de falhas

observadas na Bacia do Solimões de Megacisalhamento do Solimões. Estes autores reforçaram a tese de que a estruturação responsável por este megassistema teve início durante a divergência entre a América do Sul e a África, que produziu uma forte convergência entre o noroeste da América do Sul e um arco de ilhas, provocando uma colisão frontal que transmitiu esforços que cisalharam importantes alinhamentos preexistentes no continente Sul-Americano, formando assim uma zona de cisalhamento constituída por um sistema de dobras e falhas transcorrentes de direção predominantemente N70° – 80°E. Assim sendo, uma linha imaginária de direção N78°E e cerca de 1000km de comprimento é adotada, pelos autores acima citados, unindo o alto transversal da Bacia do Acre e o Horst do Juma para definir a região de atuação deste megacisalhamento (Fig. 4).

Desta forma, no Megassistema do Solimões são observados cinco 'trends' escalonados, que de oeste para leste, são denominados de Jandiatuba, Jutai, Ipixuna, Juruá e Urucu (Apoluceno Neto e Tsubone, 1988).

### 2.3 Magmatismo Básico

Na Bacia do Solimões, durante o Triássico e o Jurássico, ocorreram intrusões básicas sob a forma de diques e soleiras, que se introduziram na seção Paleozóica. Este magmatismo básico está associado à abertura do Golfo do México (210 Ma) e Atlântico Norte (Caputo e Silva, 1990), a partir do Triássico, afetando a porção norte da América do Sul e resultando na intrusão de níveis de soleiras de diabásio, dentro dos sedimentos da Sequência Permo-Carbonífera (Caputo e Silva, 1990).

Os três níveis de soleiras são denominadas informalmente de 1ª, 2ª e 3ª soleiras de acordo com o nível estratigráfico em que ocorrem, do topo para a base (Porsche, 1985). A primeira soleira ocorre apenas nas partes mais profundas da bacia, estando ausente por erosão nas bordas. A segunda e a terceira soleiras apresentam as maiores espessuras a leste do Arco de Carauari, diminuindo em direção ao Arco de Iquitos e estando ausentes por erosão em alguns blocos elevados por falhas. É ao longo e nas proximidades dos "trends" escalonados que ocorrem as maiores espessuras de diabásio e assimilação magmática de evaporitos paleozóicos, sugerindo que tais feições devem ter funcionado como conduto de magma (Silva, 1987). Uma vez que as espessas soleiras de diabásio foram falhadas, fraturadas e deformadas por esforços compressivos, é evidente que a atividade distensiva magmática foi anterior ao evento tectônico transcorrente instalado na região.

## CAPÍTULO 3

### ASPECTOS GERAIS DOS DADOS AEROMAGNÉTICOS UTILIZADOS

Os dados aeromagnéticos utilizados nesse trabalho foram fornecidos pela PETROBRÁS, que permitiu acessar fitas magnéticas contendo os dados originais na forma digital, de 5 projetos de perfilagem aeromagnética realizados na Bacia do Solimões (Fig. 4), sendo estes denominados de: Jutai, Caruari Norte, Caruari Sul, Coari Oeste e Coari Leste.

Estes projetos foram efetuados entre os anos de 1981 e 1984, sendo resultado de contratos firmados entre o Departamento de Exploração da PETROBRÁS (DEPEX) e três diferentes empresas especializadas em aerolevantamentos (LASA, ENCAL e PROSPEC), que conjuntamente, concluíram cerca de aproximadamente  $280.168 \text{ Km}^2$  de área prospectada.

Apesar da fase de aquisição de dados estar vinculada a diferentes empresas, os dados coletados sofreram processamentos semelhantes desde a fase de prospecção até a confecção das fitas magnéticas finais que foram utilizadas neste trabalho. Desta forma, as informações originalmente registradas a bordo da aeronave, durante a fase do levantamento aeromagnético, foram submetidas a um conjunto de técnicas especificamente elaboradas para processamento de dados aerogeofísicos. Estes conjuntos de técnicas englobaram as seguintes fases:

- 1- Identificação e correção de registros defeituosos, problemas referentes a codificação dos perfis, e duplicidade de amostragem.
- 2- Remoção de dados espúrios incompatíveis com a sequência normal de amostragem.
- 3- Atribuição de coordenadas UTM aos dados amostrados.
- 4- Correção das variações diurnas.
- 5- Nivelamento magnético dos perfis.
- 6- Obtenção dos valores anômalos pela remoção do IGRF (Campo Geomagnético Internacional de Referência).

Na Tabela-1, podemos observar as especificações de cada aerolevantamento como altura de vôo e espaçamento entre as linhas de produção. De um modo geral, podemos concluir que

os levantamentos aeromagnéticos destes projetos se propuseram a um estudo de escala regional e não de detalhe do campo magnético anômalo desta região, tendo como meta identificar 'trends' estruturais associados a fontes profundas de origem intraembasamento, e variações laterais dentro do pacote sedimentar, representadas pelas terminações das soleiras de diabásio existentes dentro do quadro estratigráfico da Bacia do Solimões.

As Figuras 5, 6, 7, 8 e 9 mostram os mapas de contorno referentes aos levantamentos aeromagnéticos utilizados. De um modo geral, observa-se que os mapas de contorno estão sujeitos a pseudo-alinhamentos orientados segundo N-S, coincidindo com a direção das linhas de vôo de produção. É fato que o sistema de amostragem de um levantamento aeromagnético é notadamente tendencioso, pelo fato de que os espaços entre duas amostras ao longo da linha de vôo são bem menores do que a separação entre as linhas. Portanto, a falta de nivelamento da malha regular a ser construída pode ocasionar isogônicas puxadas ao longo da linha de vôo, que somadas a outras variáveis como erros de posicionamento e tempestades magnéticas, podem ser as possíveis causas destes pseudo-alinhamentos que são nitidamente observados nos mapas de contorno acima citados. Desta forma, como durante a fase de interpretação qualitativa e quantitativa proposta neste trabalho foram utilizadas somente linhas de produção, não foram levadas em consideração possíveis feições lineares nesta direção, devido a dificuldade em se distinguir entre a veracidade ou não destas feições.

**TABELA 1. Especificações técnicas dos aerolevantamentos utilizados**

Projetos	Empresa executora	Ano	Altura do vôo (m)	Sentido do vôo	Espaçamento das linhas de vôo (Km)	Meridiano central	Precisão (gamas)	Área levantada (km <sup>2</sup> )	Número de amostras
Jutai	PROSPEC	1983	800	N-S	3.0	69°	1.0	69320	461911
Carauari Norte	LASA	1981	800	N-S	2.5	63° e 69°	1.0	56112	487349
Carauari Sul	ENCAL	1981	800	N-S	2.5	63° e 69°	1.0	57108	599539
Coari Oeste	PROSPEC	1984	800	N-S	3.0	63°	1.0	49256	324225
Coari Leste	ENCAL	1984	800	N-S	3.0	63°	1.0	48372	338688

## CAPÍTULO 4

### INTERPRETAÇÃO QUALITATIVA DAS FEIÇÕES LINEARES OBSERVADAS NOS DADOS AEROMAGNÉTICOS COM BASE NOS MAPAS DE CONTORNO

Como parte de seu conteúdo, este capítulo contém uma interpretação qualitativa sistemática dos padrões lineares anômalos, observados nos dados de campo potencial magnético associados aos projetos de aerolevantamentos citados anteriormente.

O objetivo, nesta fase, foi a integração das informações de ambos os projetos utilizados, que servirão de orientação à fase de interpretação posterior, com base no método de imagens digitais de sombreamento do relevo magnético anômalo total. Este estudo limitou-se, essencialmente, a uma interpretação superficial inicial das anomalias magnéticas, observadas nos mapas de contorno do campo anômalo total, com a finalidade de identificar padrões diferenciados de feições lineares anômalas, sua distribuição na bacia e a forma das possíveis fontes associadas.

Analisando os mapas de contorno (Figs. 5, 6, 7, 8 e 9), observamos que podemos distinguir três sistemas de lineamentos magnéticos principais, com direções predominantes NE-SW, NW-SE e E-W. A presença destes lineamentos magnéticos é observada em toda a região da bacia, coberta pelos dados aeromagnéticos.

Observa-se, no entanto, que existe uma diferenciação na forma de ocorrência destas feições lineares. Há regiões em que elas são observadas com clareza, devido à presença de um relevo anômalo magnético fortemente acidentado e representado por uma predominância relativa de fontes de alta frequência. Em outras regiões, a amplitude do sinal anômalo dessas feições está associada a uma topografia anômala mais suave, onde há uma ausência relativa de fontes de alta frequência.

A alternância de zonas com relevo anômalo acidentado e zonas com relevo anômalo suave, apresenta uma relação muito interessante, já que estas regiões são representadas por faixas cujos limites possuem as mesmas direções dos lineamentos magnéticos principais mencionados acima. Este aspecto pode ser observado em todos os projetos aeromagnéticos da bacia. Um exemplo característico destes tipos de feições em mapa, pode ser observado no projeto Coari Oeste (Fig. 9), onde é nítida a presença de faixas orientadas aproximadamente segundo a direção E-W, e nos

projetos Jutai (Fig. 5) e Caruari Norte (Fig. 7), onde os limites entre estas regiões distintas estão orientadas nos sentidos E-W e NE-SW.

As Figuras 10 e 11 representam perfis orientados na direção N-S, mostrando o padrão característico de anomalias observadas nos dados aeromagnéticos da Bacia do Solimões. Ambos os perfis mostram que o campo magnético anômalo total desta bacia consiste de uma superposição de anomalias bem definidas, associadas a fontes de alta frequência, e fontes de baixa frequência. As fontes de alta frequência geralmente apresentam comprimento de onda menor que 15 Km e amplitudes de até 50 nanoteslas, enquanto as fontes de baixa frequência estão associadas a anomalias regionais cujo comprimento de onda e amplitude do sinal anômalo chegam a superar 60 km e 250 nanoteslas, respectivamente.

Estes perfis sugerem duas relações importantes. A primeira é que o perfil apresentado na Figura 10, localizado na porção oeste do Projeto Caruari Norte, revela que a alternância de regiões associadas ao predomínio de fontes de alta frequência, por vezes, está associada a altos magnéticos regionais, em contraste com baixos magnéticos regionais, onde estas fontes estão relativamente mais ausentes.

A segunda relação está associada à questão da possibilidade de correlacionar as fontes de alta e baixa frequência, respectivamente, a fontes rasas e fontes profundas. Com esta finalidade, a Figura 11 mostra a aplicação de um filtro de continuação para cima do campo anômalo total, sobre uma anomalia localizada no limite NE do Projeto Caruari Sul, cujo sensor do sinal anômalo durante o aerolevante estava a uma altura média de 800 m. Portanto, podemos notar que a continuação do campo para 2 km de altura mostra uma forte atenuação do sinal da anomalia, sugerindo assim, que há uma contribuição relevante de fontes rasas no sinal anômalo.

Prosseguindo o processo para alturas de 3, 4, 5 e 10 km, notamos que o sinal também é atenuado para estas alturas, como é de se esperar para este tipo de filtragem, porém um fato importante observado é que o sinal associado a continuação do campo para uma altura de 10 km, ainda mostra um gradiente considerável, sugerindo que também há uma contribuição muito forte de fontes profundas.

Desta forma, seguindo a analogia dos relatórios internos da PETROBRAS (Canha e Ferraz,

1982), relacionados aos aerolevantamentos dos projetos Carauari Norte e Carauari Sul, além das informações geológicas desta região, como poços estratigráficos e seções sísmicas descritas em trabalhos bibliográficos publicados (Szatmari, 1984; Porsche, 1985 e Caputo e Silva, 1990), podemos considerar que a origem das fontes rasas de alta frequência e fontes profundas de baixa frequência podem estar respectivamente associadas aos três níveis de soleiras de diabásio e a presença de descontinuidades intraembasamento. Em relação as anomalias de alta frequência, Leite e Leão (1985) discutem também a presença de diques de diabásio na Bacia do Solimões como possíveis fontes geradoras dessas anomalias.

Estes fatos nos permitem afirmar que, as feições lineares magnéticas, observadas nos projetos aeromagnéticos da Bacia do Solimões, podem ser explicadas pela superposição de fontes rasas de alta frequência e fontes profundas de baixa frequência. Um outro fato importante observado nestes perfis é que estes dois tipos de fontes estão limitados pelas mesmas linhas mestras que, neste caso, são os lineamentos E-W.

Nos mapas de contorno, o padrão geral anômalo formado por estas fontes magnéticas se assemelha, de um modo geral, ao padrão anômalo gerado por um corpo prismático em baixas latitudes (Fig. 12), apresentando polaridade normal indicando, portanto, presença predominante de magnetização induzida. Nesse sentido, é observado um baixo magnético acima do corpo prismático entre dois lóbulos de altos magnéticos, sendo um maior localizado ao sul do corpo anômalo e outro menor localizado ao norte.

Considerando, portanto, o modelo de uma falha geológica, que produza um contraste de suscetibilidade magnética lateral, entre o bloco soerguido e o bloco rebaixado, em regiões localizadas em baixas latitudes, um baixo magnético geralmente estará associado à região acima do bloco soerguido, desde que, a magnetização seja induzida. Este aspecto será demonstrado no capítulo referente ao modelamento bidimensional, associado às fontes interpretadas neste trabalho, bem como os aspectos observados nas Figuras 10 e 11.

As relações entre os lineamentos magnéticos principais (E-W, NE-SW e NW-SE) se apresentam de uma forma complexa. Este fato se deve a uma superposição destas anomalias entre si, tornando difícil, à primeira vista, uma análise detalhada com base nos mapas de contorno. Esta análise será abordada, portanto, através do método das imagens digitais de sombreamento.

## CAPÍTULO 5

### INTERPRETAÇÃO DOS DIFERENTES PADRÕES DE FEIÇÕES LINEARES AEROMAGNÉTICAS UTILIZANDO IMAGENS DIGITAIS DE SOMBREAMENTO

As técnicas de processamento de imagens digitais têm sido utilizadas no campo da geofísica com sucesso, quando se objetiva uma melhor interpretação qualitativa dos dados, se comparados com os mapas de contorno do campo anômalo convencionais. Dentre estas técnicas, destaca-se o método das imagens de relevo sombreado, principalmente quando são utilizados dados de campo potencial como levantamentos gravimétricos e magnetométricos, objetivando realçar feições anômalas vinculadas aos aspectos geológicos estruturais da área em estudo (Horn e Bachman, 1978; Guinness et al., 1983; Dods et al., 1985; Kowalik e Glenn, 1987; Broome, 1990; Machado, 1990).

As imagens de relevo sombreado são geradas a partir de um arquivo de dados, que são reformatados e representados em forma de uma superfície topográfica que, posteriormente, é iluminada por uma fonte artificial (simulando o sol, por exemplo), o que permite realçar o relevo topográfico associado ao campo anômalo.

Este método consiste, essencialmente, em calcular a intensidade de luz refletida em um ponto de observação, quando a fonte de luz encontra-se em uma dada posição, distante em relação a um ponto superficial do relevo topográfico anômalo. A aplicação deste método consiste numa ferramenta relativamente simples, porém, deve ser utilizado com atenção, já que, dependendo da superfície de reflectância associada ao relevo topográfico anômalo a ser iluminado pelo método, podem ocorrer fatores como iluminação mútua de elementos desta superfície anômala e sombreamento entre elementos vizinhos que podem mascarar certos tipos de anomalias de pequenas extensões.

As vantagens do método para o estudo de feições lineares, associadas a aspectos geológicos estruturais, resumidamente, são:

- 1) Realçar feições anômalas que não são observadas nitidamente nos mapas de contorno convencionais através da aplicação de exauros verticais.

- 2) Pode ser utilizado como filtro direcional, eliminando (ou atenuando) a presença das feições lineares paralelas à direção de iluminação, e evidenciando aquelas que se encontram orien-



tadas transversalmente à direção de iluminação.

3) O consumo de CPU é relativamente baixo, se comparado com os métodos numéricos de filtragem direcional que utilizam a F.F.T, já que, matematicamente, o método consiste simplesmente em calcular um produto vetorial, como será mostrado a seguir.

### 5.1 Considerações Teóricas

Horn e Bachman (1978) descrevem os conceitos matemáticos básicos deste método. Assim sendo, se considerarmos o campo potencial  $F(x, y)$  representado por uma componente vertical de um sistema de coordenadas cartesianas (Fig. 13), os respectivos gradientes horizontais desta função podem ser escritos na forma:

$$p = \frac{\partial F(x, y)}{\partial x}$$

$$q = \frac{\partial F(x, y)}{\partial y}$$

O vetor normal unitário  $\vec{n}$  a um elemento superficial (Fig. 14) é definido como

$$\left( \frac{p}{\sqrt{p^2 + q^2 + E^2}} \vec{i}, \frac{q}{\sqrt{p^2 + q^2 + E^2}} \vec{j}, -\frac{E}{\sqrt{p^2 + q^2 + E^2}} \vec{k} \right), \quad (1)$$

onde  $E$  é o exagero vertical assinalado a função do campo potencial  $F(x, y)$ .

Se a direção entre o elemento superficial e a fonte de luz é dada em termos de um ângulo de inclinação e um ângulo azimutal, o vetor que define esta direção terá os seguintes cossenos direcionais:

$$\vec{s} = \left( \cos(\theta) \cdot \cos(\phi) \vec{i}, \sin(\theta) \cos(\phi) \vec{j}, \sin(\phi) \vec{k} \right). \quad (2)$$

O cosseno do ângulo entre os vetores  $\vec{n}$  e  $\vec{s}$ , define a intensidade de iluminação refletida no ponto de observação e, portanto, pode ser escrito na forma do produto escalar abaixo

$$R(x, y) = \vec{n} \cdot \vec{s} = \cos(\lambda) = \frac{p \cos(\theta) \cos(\phi) - q \sin(\theta) \cos(\phi) - E \sin(\phi)}{\sqrt{p^2 + q^2 + E^2}}. \quad (3)$$

A intensidade de iluminação, representada pela função  $R(x, y)$ , varia na escala de cores assinalada pelo usuário do método, de acordo com as seguintes relações:

$$R(x, y) = \begin{cases} \vec{n} \cdot \vec{s}, & \text{se } \vec{n} \cdot \vec{s} > 0 \\ 0, & \text{se } \vec{n} \cdot \vec{s} \leq 0 \end{cases} . \quad (4)$$

A escolha da faixa de cores que se deseja trabalhar é consequência de uma busca da melhor resolução para o método, sendo, portanto, alcançada por tentativa. No caso de estudos geológicos estruturais, observa-se que a melhor resolução para dados do campo potencial gravimétrico ou magnético é atingida quando utilizamos uma variação de  $R(x, y)$  da cor branca para a cor preta, passando pelas tonalidades de cinza. Portanto, pelas relações definidas acima, para esta faixa de cores, a cor branca corresponderá às regiões onde o elemento superficial é normal em relação a direção da fonte luminosa, ou seja,  $\vec{n} \cdot \vec{s} = 1$ , e a cor preta estará restrita às regiões que representam a sombra do elemento superficial normal onde  $\vec{n} \cdot \vec{s} \leq 0$ . Assim, numa região onde o relevo anômalo se apresenta muito acidentado, com vales e montanhas, ocorre o contraste máximo entre as cores preto e branco.

A porcentagem da área branca mais a área preta, em relação a área total da imagem, consiste num fator importante para a obtenção de uma imagem com resolução razoável. Esta relação é definida como nível de saturação ( $S$ ), e o seu valor está vinculado principalmente ao exagero vertical  $E$ , e secundariamente à direção de iluminação. Uma saturação alta significa que a imagem apresenta-se praticamente em preto e branco, suprimindo os tons de cinza, enquanto as imagens com baixa saturação mostram uma tonalidade de cinza predominante e constante. Apesar da simplicidade da definição do nível de saturação, a sua dependência com a melhor resolução desejada é bastante relativa, já que o conceito do que é considerado de baixa ou alta saturação depende muito de cada caso. Por exemplo, se utilizarmos dados gravimétricos e magnetométricos, com a finalidade de realçar feições anômalas lineares associadas a fontes rasas de alta frequência, para se obter uma imagem com resolução adequada, o nível de saturação deve estar entre 5% e 10% (Machado, 1990), ou seja, valores abaixo de 5% são considerados baixos e acima de 10% altos, e não propiciam uma resolução aconselhável.

## 5.2 Aplicação do Método das Imagens

A aplicação do método das imagens foi realizada a partir dos dados originais dos projetos aeromagnéticos. Estes projetos caracterizam-se por grandes extensões e, conseqüentemente, englobam um grande número de amostras (Tab. I). Este fato, inviabiliza computacionalmente a geração de uma imagem digital recobrando cada projeto, sem que fosse necessário gerar sub-áreas.

Desta forma, a solução adotada foi aplicar um fator de decimação 4 nos dados originais. Esta solução foi estudada com cuidado antes de gerar as imagens digitais finais. Nestes testes preliminares, foi observado que, para uma altura média de vôo de 800 m, característica dos projetos utilizados, o espaçamento médio de 200 m entre cada amostra (conseqüência do fator de decimação) não propiciou uma perda de resolução que justificasse, nesta fase, utilizar os dados originais com espaçamento médio de 50 m entre cada amostra, ou seja, sem decimação.

Após a decimação, os dados originais foram reformatados e gridados em uma malha regular com espaçamento de 1 km, utilizando o algoritmo proposto por Briggs (1974) que utiliza o método da mínima curvatura. Em seguida, cada projeto foi sombreado seguindo a metodologia descrita no ítem anterior. O sombreado foi feito variando do branco ao preto dentro de uma escala com 256 tonalidades de cinza, conforme as características da estação gráfica "Raster Technologies, ONE 80", associado ao sistema Disco VAX da UFFa.

Os dados anômalos utilizados representam os valores do campo magnético anômalo total. A escolha de se trabalhar com o campo total e não com uma separação regional-residual, se deve principalmente ao objetivo deste trabalho, que é de esclarecer as relações entre os lineamentos magnéticos observados e associados a possíveis estruturas geológicas, características da evolução tectônica da Bacia do Solimões.

A partir da análise dos mapas de contorno do campo magnético anômalo, que constatou a presença de três direções principais (NW-SE, NE-SW e E-W) de lineamentos magnéticos, a metodologia adotada nesta fase foi a de gerar imagens digitais cuja iluminação artificial possibilitasse eliminar, ou atenuar, uma direção preferencial de um dos três lineamentos magnéticos, evidenciando as relações entre os dois lineamentos remanescentes.

Portanto, foram simulados para cada projeto três direções de iluminação e sombreado

artificiais. Uma orientada segundo a direção NW-SE, permitindo eliminar os lineamentos paralelos a esta direção e evidenciar as relações entre os lineamentos E-W e NE-SW. Com o mesmo objetivo, a segunda iluminação escolhida foi orientada na direção NE-SW, evidenciando as relações entre os lineamentos magnéticos E-W e NW-SE. A terceira direção de iluminação utilizada foi N-S, que além de eliminar a influência dos pseudo-alinhamentos causados por isogônicas puxadas ao longo das linhas de vô, mostrou o padrão geral estrutural formado pela interação dos três lineamentos principais. É sobre esta imagem que é sobreposta a interpretação final de cada projeto, levando em consideração os aspectos observados segundo as iluminações anteriores.

### 5.3 Descrição das Imagens

A interpretação das imagens digitais se limitou a identificar e delimitar padrões de feições lineares bem definidas.

É fato que o método das imagens consiste apenas em uma ferramenta de interpretação qualitativa e, portanto, sua resolução está associada à qualidade e às características dos dados utilizados (Tab. 1).

No presente caso, por exemplo, além das vantagens do método, como as descritas anteriormente, existem também algumas 'desvantagens', como realçar feições associadas a erros presentes nos dados, como a presença de pseudolineamentos magnéticos associados a isogônicas puxadas ao longo das linhas de vô.

Para uma melhor compreensão do leitor, a interpretação final de cada jogo de imagens foi representada numa forma que desse uma idéia do tipo de detalhes que a resolução dos dados utilizados permitiram.

Desta forma, foram diferenciadas, sempre que possível, feições magnéticas bem definidas daquelas onde o sinal anômalo é relativamente mais fraco. Não foi considerado também, nenhum lineamento magnético orientado na direção N-S, devido à presença de pseudolineamentos nesta orientação, e que coincidem com a direção das linhas de vô dos projetos aeromagnéticos utilizados.

O princípio físico, que foi tomado como base para a interpretação, é que as regiões nas quais observamos a intensidade de iluminação, sendo representada por tonalidades de cores mais claras, definem no presente caso, altos magnéticos e, conseqüentemente, naquelas onde as tonalidades de

intensidade de iluminação adquirem colorações relativamente mais escuras, estão localizados baixos magnéticos. Entretanto, cabe ressaltar que a tonalidade é também fortemente controlada pela orientação do relevo magnético em relação a direção de iluminação.

Partindo deste princípio, são mostrados a seguir os aspectos descritivos observados com base nas imagens digitais associadas a cada projeto.

### Projeto Jutai

A região coberta pelo Projeto Jutai corresponde à sub-bacia do Jandiatuba e compreende feições geológicas estruturais já descritas na literatura, como o Alto Transpressional do Eirunepé, o 'Trend' do Jandiatuba e a parte SW do 'Trend' do Jutai.

As imagens digitais geradas para este projeto (Figs. 15, 16 e 17) mostram um aspecto interessante que se destaca a primeira vista. Observa-se a definição de interfaces que separam zonas caracterizadas por uma predominância de fontes de alta frequência, alternando com zonas onde qualitativamente há um predomínio relativo de fontes de baixa frequência. Um fato que desperta a atenção é que estas mesmas interfaces, por vezes, estão associadas, numa escala mais regional, aos limites entre altos e baixos magnéticos, ou seja, regiões com intensidade de iluminação representadas por tonalidades claras em contraste com tonalidades escuras, respectivamente, e que estes limites coincidem com as mesmas direções dos lineamentos estruturais descritos para esta região, principalmente as direções NE-SW, e E-W.

Um exemplo desta natureza pode ser observado na porção centro sul do projeto, onde fica caracterizada a presença de uma estrutura romboédrica, de grande extensão e cujos limites laterais estão orientados na direção NE-SW e E-W.

Partindo desta feição, que se encontra aproximadamente entre os mesmos limites do Alto Transpressional do Eirunepé, ao observarmos mais detalhadamente, podemos notar que os seus limites laterais orientados segundo NE-SW encontram-se seccionados por lineamentos magnéticos orientados na direção E-W. Assim sendo, considerando a hipótese de que os lineamentos magnéticos em questão estão associados a fontes originadas a partir de corpos afetados estruturalmente (ex. falhas), pode-se sugerir que há pelo menos dois eventos tectônicos distintos, que se utilizaram destas mesmas linhas mestras (E-W e NE-SW).

Desta forma, podemos afirmar com base nas imagens digitais que os lineamentos orientados segundo E-W constituem feições lineares proeminentes (inclusive nas regiões onde há um domínio relativo de fontes de baixa frequência), caracterizadas por apresentarem grandes extensões (da ordem de algumas centenas de quilômetros) e, principalmente, por possibilitarem definir uma relação temporal com respeito aos lineamentos NE-SW e NW-SW, já que os lineamentos magnéticos E-W seccionam e deslocam as demais lineações magnéticas (Figs. 15, 16 e 17).

As relações entre os lineamentos NE-SW e E-W podem ser melhor evidenciadas nas imagens com iluminação artificial orientadas na direção NW-SE. Nessas imagens, observa-se que os lineamentos NE-SW também consistem em feições lineares marcantes. Há duas formas de ocorrência dessas feições lineares. A primeira caracteriza-se por compreender grandes extensões que, por vezes, podem ultrapassar 100 km, mostrando que apesar de serem seccionadas pelos lineamentos E-W podem estar associadas a feições lineares aproximadamente contínuas. Os lineamentos do Jandiatuba e Jutai são relativamente bem definidos nas imagens, e possuem uma correspondência com esta forma de ocorrência.

A segunda forma de ocorrência do lineamento NE-SW é caracterizada por apresentar extensões menores (menos de 40 km) e cujos limites têm terminações nos lineamentos E-W, mostrando, portanto, que possivelmente por uma causa física ou tectônica, não representam feições lineares contínuas como no primeiro caso.

Os lineamentos NW-SE se apresentam de forma análoga aos lineamentos NE-SW, ou seja, por vezes são representados por feições lineares contínuas de grandes extensões, e em outras por feições lineares descontínuas, sendo ambas seccionadas pelos lineamentos E-W. No primeiro caso, apesar de serem nítidos nas imagens (Figs. 16 e 17), não são descritos na literatura a presença nesta região destas feições, como ocorre com os lineamentos do Jandiatuba e Jutai.

Um fato também a ser detalhado é que os lineamentos NW-SE e NE-SW possuem uma relação entre si. Observa-se claramente que eles se interceptam entre si. Há regiões em que o lineamento NW-SE secciona o lineamento NE-SW, e outras onde é observada uma inversão desta relação.

De um modo geral, o padrão geral apresentado pela interação das relações entre as três

direções principais de lineamentos magnéticos (E-W, NE-SW, e NW-SE) é caracterizado pela presença de feições romboédricas, característica que será analisada no próximo capítulo.

### Projeto Carauari Sul

O Projeto Carauari Sul engloba a porção sul da sub-bacia do Juruá. Esta região consiste na área mais estudada da Bacia do Solimões devido à presença dos lineamentos estruturais do Juruá, Urucu e Ipixuna. Esses lineamentos estruturais foram alvos, por parte da PETROBRAS, de detalhamento através do método sísmico, impulsionado pelo interesse econômico das estruturas as quais estão associadas ao traqueamento de hidrocarbonetos na região.

As imagens geradas para este projeto (Figs. 18, 19 e 20) mostram claramente a presença de lineamentos magnéticos que coincidem com a localização desses lineamentos estruturais (Juruá, Urucu, e Ipixuna). Este detalhe será de vital importância para reforçar os detalhes adquiridos na interpretação destas imagens associadas às relações dos três lineamentos principais E-W, NW-SE e NE-SW, e que já foram observados nas imagens referentes ao Projeto Jutai.

Os lineamentos estruturais do Juruá e Ipixuna são observados nas imagens como feições lineares magnéticas de grandes extensões (mais de 100 km), orientadas aproximadamente na direção N40-60E, sendo, portanto, correlacionáveis com os lineamentos NE-SW. É importante mencionar que lineamentos magnéticos, ainda não denominados formalmente, apresentando as mesmas dimensões e orientação, são observados nas imagens digitais. O 'Trend' do Urucu também é observado a partir de uma feição linear magnética orientada segundo esta direção preferencial (NE-SW) compreendendo, no entanto, uma extensão menor que 20 km. Várias outras feições análogas ao 'Trend' do Urucu, que também não foram denominadas formalmente, são observadas nas imagens.

Analisando as imagens (Figs. 18 e 20), podemos visualizar que essas feições lineares (NE-SW) encontram-se seccionadas por lineamentos magnéticos orientados aproximadamente no sentido E-W. Assim sendo, os lineamentos E-W adquirem novamente neste projeto uma posição de destaque devido ao seu caráter contínuo, representado por grandes extensões (centenas de quilômetros), e suas implicações físicas e tectônicas que, por algum meio, condicionam a forma em que se apresentam os lineamentos NE-SW.

Um outro aspecto observado nas imagens do Projeto Carauari Sul, em relação aos lineamentos

mentos E-W, consiste no fato de que estas feições não são perfeitamente retilíneas, mostrando, portanto, curvaturas de baixo ângulo, que por vezes, convergem para o quadrante NE e em outras, para o quadrante SE. Fica claro que esses lineamentos se apresentam também em extensões menores que 100 km, e que devido ao fato descrito acima, observa-se, localmente, a interação entre lineamentos E-W formando feições do tipo cunha, ou seja, lineamentos aproximadamente E-W de menores extensões, orientados nas direções N70-80E e N70-80W terminando em forma de cunhas em lineamentos E-W de dimensões maiores.

Os lineamentos orientados na direção NW-SE também são visíveis nas imagens digitais (Figs. 19 e 20), porém são menos marcantes se comparados com os lineamentos E-W e NE-SW. Mesmo assim, são feições lineares que se destacam nesta área e apresentam as mesmas relações descritas para o Projeto Jutaí, ou seja, são seccionadas pelos lineamentos E-W. Da mesma forma, também apresentam relações com os lineamentos NE-SW, seccionando-os localmente, sendo que em outras regiões a situação parece ser inversa.

Ao observarmos as imagens geradas para o Projeto Carauari Sul como um todo, concluímos que há um predomínio de fontes de alta frequência. Este aspecto só é quebrado na porção sul do projeto, onde encontramos interfaces separando este padrão de regiões onde as fontes de alta frequência são relativamente menos evidenciadas. Os limites destas zonas encontram-se nitidamente orientados segundo as direções E-W e NE-SW e, analogamente às imagens do Projeto Jutaí, os limites NE-SW se encontram seccionados por lineamentos magnéticos E-W, sugerindo mais uma vez que o padrão de feições romboédricas, gerado a partir da interação dos três tipos principais de lineamentos (E-W, NE-SW e NW-SE), provavelmente está associado a pelo menos dois eventos tectônicos distintos que se utilizaram destas mesmas linhas de fraqueza.

### Projeto Carauari Norte

O Projeto Carauari Norte está compreendido na porção norte da sub-bacia do Juruá. Esta região foi pouco estudada, não sendo, portanto, descrita até o presente a presença de grandes lineamentos tectônicos nesta área.

As imagens digitais associadas ao Projeto Carauari Norte (Figs. 21, 22, e 23) mostram o mesmo padrão de feições lineares observado nos projetos Jutaí e Carauari Sul, possibilitando



afirmar que esta faixa altamente estruturada, observada na Bacia do Solimões, não está restrita à porção sul da bacia, compreendendo assim uma zona de deformação bem mais longa do que a mencionada na literatura (Caputo e Silva, 1990), abrangendo, portanto, pelo menos 350 a 400 km de largura.

Neste contexto, o padrão geral das feições lineares observadas neste projeto também resultou da interação dos três lineamentos magnéticos orientados nas direções E-W, NE-SW e NW-SE, mostrando as mesmas relações descritas para os demais projetos.

É importante mencionar que alguns lineamentos NE-SW chamam a atenção por sugerirem uma relação de continuidade com lineamentos de mesma orientação, observados no Projeto Carauari Sul, e que os lineamentos NW-SE se apresentam, no presente projeto, como feições lineares magnéticas mais marcantes, na mesma proporção dos lineamentos NE-SW.

Outro aspecto que novamente se sobressai nas imagens associadas ao Projeto Carauari Norte é a diferenciação de regiões onde há predominância de fontes de altas frequências, em relação a regiões caracterizadas pelo predomínio de fontes de baixas frequências, através de interfaces orientadas segundo as três direções principais de lineamentos. Este aspecto é marcante na porção NW do projeto e apresenta analogia com a posição definida para o Alto de Carauari. Porém, o Alto de Carauari é definido na literatura como uma feição aproximadamente contínua orientada no sentido NW-SE e atravessando de norte a sul a bacia. Este padrão não é condizente com as imagens, já que os limites desta região, marcada pela ausência relativa de fontes de alta frequência que coincidem com um baixo magnético regional, estão orientados principalmente nas direções NE-SW e E-W compreendendo somente a porção NW da região recoberta pelo projeto.

### **Projeto Coari Oeste**

O Projeto Coari Oeste corresponde ao projeto que faz fronteira com os limites leste dos projetos Carauari Norte e Carauari Sul, estando assim também situado na sub-bacia do Juruá. A região coberta por este projeto já fora alvo de levantamentos sísmicos pela PETROBRÁS, principalmente na região centro sul do projeto, onde foram definidas formalmente estruturas tectônicas como o Horst do Juma.

O Horst do Juma consiste de uma feição bem definida nas imagens (Figs. 24 e 26), onde se

apresenta por um par de lineamentos magnéticos orientados aproximadamente na direção N30-40E, sendo então correlacionáveis aos lineamentos NE-SW. A partir desta feição, observamos novamente a presença de lineamentos E-W de grandes extensões seccionando estas feições lineares, formando assim o mesmo padrão de feições romboédricas geradas pela interação das três direções de lineamentos magnéticos (E-W, NE-SW e NW-SE), que estão presentes em toda a área compreendida pelo projeto. Fica claro novamente que os lineamentos magnéticos E-W apresentam regiões com curvaturas de baixo ângulo, e que há feições lineares aproximadamente E-W (N70-80E e N70-80W) de menores extensões que, localmente, terminam em lineamentos E-W de grandes extensões em forma de cunhas.

A presença de interfaces retilíneas separando regiões associadas a altas frequências e baixas frequências também é observada nas imagens digitais deste projeto.

### Projeto Coari Leste

O Projeto Coari Leste consiste no projeto aeromagnético localizado no limite leste da Bacia do Solimões, ainda situado na sub-bacia do Juruá, porém englobando o limite tectônico, representado pelo Arco de Purus, que separa esta bacia da Bacia do Amazonas.

O Arco de Purus é representado, nas imagens digitais geradas para este projeto (Figs. 27 e 29), por um sistema de lineamentos magnéticos orientados aproximadamente na direção N40-60W, sendo, portanto, correlacionáveis aos lineamentos NW-SE que, nesta região, sobressaem-se em relação aos lineamentos NE-SW, e que, por sua vez, também consistem em feições lineares marcantes na região.

As imagens mostram que esses lineamentos magnéticos, associados ao Arco de Purus, também se encontram seccionados por lineamentos magnéticos de grande extensão e orientados na direção E-W, sugerindo, portanto, que este padrão magnético possivelmente também está presente na Bacia do Amazonas (Médio e Baixo Amazonas), e pode, portanto, ser correlacionável a um possível evento tectônico contemporâneo que faz parte da evolução estrutural destas regiões.

Os lineamentos E-W nesta região se caracterizam por trechos de grandes curvaturas, principalmente na sua porção sul. Nesta região é clara a presença de faixas orientadas E-W separando regiões caracterizadas pelo predomínio de fontes de baixa frequência de regiões onde há um pre-

domínio de fontes de alta frequência.

## CAPÍTULO 6

### INTEGRAÇÃO DOS ASPECTOS OBSERVADOS NAS IMAGENS DIGITAIS COM OS CONCEITOS ASSOCIADOS A ZONAS E CINTURÕES DE CISALHAMENTOS

As características do método de imagens de sombreamento, dentre elas a aplicação de exa-geros verticais e iluminação nas diferentes direções, permitiram definir quatro aspectos relevantes no contexto das relações entre as três direções principais de lineamentos magnéticos E-W, NE-SW e NW-SE, cuja compreensão possui implicações relevantes para o entendimento do processo geotectônico evolutivo da Bacia do Solimões. Estes aspectos são:

I – Os lineamentos magnéticos orientados na direção E-W representam feições lineares proeminentes que são observadas com destaque em todos os projetos aeromagnéticos utilizados. Estas feições lineares caracterizam-se, principalmente, por compreenderem extensões da ordem de algumas centenas de quilômetros, apresentarem localmente trechos curvilíneos, e lineamentos magnéticos associados de menores extensões (menos de 100km) orientados, aproximadamente, nas direções N70-80E ou N70-80W.

II – Os lineamentos magnéticos NE-SW e NW-SE também representam feições lineares marcantes que, por vezes, mostram ser estruturas aproximadamente contínuas e muito extensas, apresentando correlações com feições estruturais já mencionadas formalmente na literatura. Estas feições lineares magnéticas também ocorrem compreendendo extensões menores (menos de 40 km) evidenciando que, por algum fator físico ou tectônico, podem não corresponder a estruturas tectônicas contínuas.

III – Os lineamentos magnéticos orientados na direção E-W seccionam os lineamentos magnéticos orientados nas direções NE-SW e NW-SE, formando um padrão geral representado por estruturas romboédricas e localmente, por feições lineares com terminações em forma de cunha.

IV – É nítida a presença de regiões caracterizadas por um relevo anômalo acidentado representado pelo predomínio de fontes de alta frequência, em contraste com regiões onde há uma ausência relativa destas fontes de alta frequência. Os limites entre estas duas regiões magneticamente distintas são representados por interfaces orientadas na mesma direção das linhas mestras E-W,

NE-SW e NW-SE sendo que os limites orientados segundo NE-SW e NW-SE são seccionados por lineamentos magnéticos E-W.

Ao compararmos o padrão estabelecido pelas relações entre os lineamentos magnéticos E-W, NE-SW e NW-SE com os possíveis mecanismos de deformação capazes de desenvolver grandes feições estruturais, sendo estes associados a regimes tectônicos bem definidos, podemos observar que o padrão observado nas imagens digitais é altamente correlacionável com o padrão de feições estruturais, implantadas através da evolução e desenvolvimento de zonas de cisalhamento direcionais (strike-slip shear zones) ou transcorrentes (Fig. 30), que por sua vez estão associadas a bordas conservativas de placas litosféricas, ou seja, zonas transformantes (Woodcok & Fisher, 1986).

As zonas de cisalhamento aparecem em sistemas afetando faixas caracterizadas pela deformação e estruturação linearizada, que são denominadas de cinturões de cisalhamento, podendo atingir larguras de dezenas a centenas de quilômetros e extensões de centenas a milhares de quilômetros (Hasui e Costa, 1991).

A presença de zonas de cisalhamento transcorrentes adjacentes, induz a formação de feições estruturais que são função da separação e recobrimento entre estas zonas. Este quadro estrutural, dependendo do tipo de recobrimento entre estas zonas de cisalhamento, pode formar feições do tipo dobras e zonas de empurrão sob transpressão, zonas normais sob transtação, e duplexes de extensão e contração. Assim sendo, se as zonas de cisalhamento são dextrais, o recobrimento à esquerda gera esforços transpressionais na região entre elas, enquanto o recobrimento à direita envolve transtação, sendo válida a regra inversa para o caso sinistral (Fig. 31).

Os duplexes acima citados representam estruturas de deslocamentos em faixas entre maciços intactos ou menos deformados e seu desenvolvimento está associado à individualização de escamas sigmóides que se agregam umas às outras sucessivamente (Fig. 32 e 33). Estas estruturas podem promover deformações que são acomodadas através de distorção ou elevações topográficas de blocos, além de formação de estruturas de ejeção ou bacias (Fig. 34). Além dos duplexes de contração e de extensão, é possível haver o desenvolvimento destas estruturas nos trechos planares das zonas transcorrentes pela atuação de descontinuidades dos tipos R, P e D que são denominados de duplexes de Riedel (Fig 35).

Os trechos curvilineares de uma zona transcorrente (Fig. 30) são classificados em curvas convergentes (*restraining bends*) ou em curvas divergentes (*releasing bends*) (Wilcox, 1973; Crowel, 1974; Sylvester e Smith, 1976; Christie-Blick e Biddle, 1985; Harding et al., 1985). Nas curvas convergentes, a deformação está sujeita a efeitos de transpressão que formam cunhas ou lascas que tendem a ser expelidas para cima, formando estruturas de ejeção (*push-up structure*), que, por sua vez, lembram estruturas do tipo horst. Nas curvas divergentes, a deformação é ocasionada por efeitos transtativos, promovendo o abatimento das cunhas ou lascas formadas, dando origem a uma depressão denominada de *bacia pull-apart*.

Seguindo esta analogia, agora podemos comparar estes diversos tipos de feições estruturais com as feições lineares magnéticas observadas nas imagens digitais.

Partindo inicialmente da interpretação associada às imagens digitais do Projeto Carauari Sul, que consiste na região mais estudada da Bacia do Solimões, fornecendo assim informações geológicas a priori relevantes, podemos afirmar que, de um modo geral, o padrão estabelecido pela configuração estrutural observada é correlacionável ao estabelecimento de um regime predominantemente transpressivo, se levarmos em consideração o binário cisalhante no sentido dextral (Fig. 36).

A característica transpressiva desta região pode ser, em grande parte, explicada pelo estabelecimento de recobrimientos laterais à esquerda entre zonas de cisalhamento adjacentes orientadas na direção E-W, e cujas separações entre si apresentam extensões bem menores (menos de 20 km) que a extensão destas feições lineares magnéticas.

Desta forma, as estruturas formadas a partir deste quadro, e que provavelmente contribuem para o estabelecimento de um contraste de suscetibilidade magnética, capaz de gerar os lineamentos magnéticos observados nas imagens digitais, seriam estruturas de ejeção representadas principalmente por falhas reversas orientadas no sentido NE-SW e E-W, e secundariamente dobras cujos eixos estão orientados no sentido NE-SW. Porsche (1985), ao estudar a tectônica da faixa de dobramentos do Juruá, observou em seções sísmicas, a ocorrência de falhas reversas e dobras associadas às mesmas direções estruturais propostas neste trabalho. Este autor concluiu que um modelo estrutural que considera uma transcorrência com sentido de deslocamento dextral, acompanhada de uma componente de compressão, é o que melhor explica as feições estruturais

existentes nesta região.

Utilizando a terminologia utilizada por Wilcox (1973) e Tchalenko e Ambrasey (1970) (Fig. 35 c), podemos considerar que os lineamentos magnéticos E–W, possivelmente, constituem a zona de deslocamento principal, ou seja, as estruturas formadas nesta região, em grande parte, estão associadas ao recobrimento de zonas de cisalhamento dextrais de falhas do tipo Y com Y, (Y=D).

Um outro meio possível de formação de estruturas transpressionais, observadas nas imagens digitais desta região, está associado à formação de duplexes direcionais gerando um padrão de feições lineares, que sugerem a presença de estruturas em flor positivas e negativas. Estas estruturas, provavelmente, estão associadas aos lineamentos magnéticos orientados aproximadamente nas direções N70–80E e N70–80W que, segundo a terminologia adotada, constituem respectivamente as falhas do tipo P e R, que interagem com as falhas Y (E–W), podendo formar localmente feições lineares em forma de cunha.

Assim sendo, o primeiro caso formará estruturas em flor negativa, associadas a falhas do tipo R (N70–80W) (Fig. 37 a), e no segundo caso formará estruturas em flor positiva associadas a falhas do tipo P (N70–80E), (Fig. 37 b). É nessas duas regiões que é observada com mais clareza, a interação dos lineamentos magnéticos NW–SE e NE–SW, ou seja, quando há formação de estruturas em flor positiva, as falhas P (NE–SW) interceptam e deslocam os lineamentos NW–SE, sendo válida a regra inversa para o caso da presença de estruturas em flor negativa. Porsche (1985) e Caputo e Silva (1990) descrevem a presença de estruturas em flor positiva nesta região, associadas a falhas orientadas no sentido N70–80E.

Um fato importante que agora pode ser melhor analisado, refere-se aos lineamentos magnéticos N40–60E e N40–60W relacionados aos lineamentos NE–SW e NW–SE que, localmente, mostram uma continuidade tal que possibilita relacioná-los a estruturas de grandes extensões. Estas direções (NE–SW e NW–SE) são descritas por alguns autores como os dois sistemas de lineamentos principais observados no Craton Amazônico (Fig. 38), sendo, portanto, associados a falhas ou fraturas policíclicas de até milhares de quilômetros de extensão, características de plataformas antigas reativadas (Cordani et al., 1984). Boa Hora et al. (1984), através de uma interpretação qualitativa do campo magnético da Bacia do Solimões, utilizando os mesmos projetos do presente trabalho, mostram que as duas direções de lineamentos principais são N50–60E e

N60–70W, que se apresentam de forma retilínea e contínua por mais de 150 km de extensão. Porém, estes autores consideram estas falhas como estruturas intraembasamento, não afetando os sedimentos paleozóicos. No entanto, as imagens digitais e os dados sísmicos comprovam que estas direções estruturais também estão associadas a fontes mais rasas, que, no caso magnético, são representadas pelos níveis de soleiras que são dobrados e deslocados verticalmente por falhas reversas.

Nesse sentido, considerando que diversos fatores podem influenciar no desenvolvimento de uma zona transcorrente, como por exemplo, a competência do material geológico que está sendo submetido aos esforços cisalhantes e a presença de zonas de fraqueza pré-existentes, é razoável considerar a hipótese de que o estabelecimento do quadro estrutural formado a partir do recobrimento entre zonas de cisalhamentos adjacentes, tenha utilizado estas linhas de fraqueza que já faziam parte da evolução tectônica da Bacia do Solimões desde sua formação, e que foram, portanto, reativadas, formando o padrão geral observado tanto nas imagens digitais como no método sísmico.

Portanto, as porções E–W e NE–SW dos lineamentos magnéticos, que possuem correlação com os 'trends' do Juruá, Ipixuna e Urucu, podem ser correlacionadas a falhas paralelas ao deslocamento principal associada a zonas de cisalhamento Y que, pelo recobrimento a esquerda entre si, geram esforços transpressivos e a conseqüente reativação destas zonas de fraqueza pré-existentes orientadas na direção NE–SW, induzindo assim, a formação de falhas reversas e dobras associadas a esta mesma direção.

As imagens digitais do projeto Carauari Norte mostram o mesmo padrão magnético observado no Projeto Carauari Sul, sugerindo que uma provável correlação com um regime estrutural predominantemente transpressivo abrange uma faixa de deformação com extensão mais larga do que a descrita nos trabalhos bibliográficos existentes sobre a região (Porsche, 1985; Caputo e Silva, 1990). Esta faixa, portanto, compreende pelo menos de 350 a 400 km de largura com base na extensão N–S recoberta pelos projetos utilizados.

Vale ressaltar que, nas regiões descritas como áreas onde há um predomínio relativo de fontes de baixa frequência, este quadro estrutural também pode ser delimitado graças, principalmente, a aplicação de exauros verticais permitidos pelo método das imagens, mostrando que este evento tectônico agiu de uma forma consistente entre estas duas regiões magneticamente distintas.



Sendo assim, apesar da falta de um detalhamento sísmico nesta região coberta pelo Projeto Carauari Norte mais próxima do Rio Solimões, as feições lineares magnéticas mostram que as feições estruturais geológicas provavelmente presentes, com base no modelo adotado associado ao recobrimento e separação de zonas de cisalhamentos dextrais, orientadas no sentido E-W, serão também representadas, predominantemente, por estruturas de ejeção como falhas reversas, estruturas em flor positivas e dobras associadas.

Um outro fato já mencionado anteriormente é que os lineamentos magnéticos NE-SW do Projeto Carauari Norte apresentam correlações de continuidade com os mesmos lineamentos magnéticos do Projeto Carauari Sul, evidenciando mais uma vez a possibilidade dessas estruturas serem reativações em forma de falhas reversas e dobras a partir de zonas de fraqueza antigas.

As feições estruturais observadas no Projeto Jutai podem ser explicadas pela mesma descrição apresentada acima. A região oeste da Bacia do Solimões, recoberta por este projeto, não compreende o Arco de Iquitos, que corresponde ao limite desta bacia com a Bacia do Acre. Mesmo assim, as características de um padrão predominantemente transpressivo nesta região estão presentes nas imagens digitais deste projeto, permitindo especular que estes esforços cisalhantes podem ter associações com esforços semelhantes contemporâneos na Bacia do Acre. Muhlmann et al. (1982), interpretando os dados de reflexão sísmica da Bacia do Acre, identificaram fases de deformação compressiva gerando dobras e falhas reversas associadas às mesmas direções observadas na Bacia do Solimões.

As mesmas relações são verificadas para os projetos Coari Oeste e Coari Leste, sendo que o último mostra um aspecto chave que servirá como base, posteriormente, quando enquadrarmos este megasistema de cisalhamento no contexto evolutivo tectônico da Bacia do Solimões. Isto porque o Arco de Purus é observado nesta região através de um sistema de falhas NW-SE que é claramente seccionado pelas zonas de cisalhamentos E-W, que reativam estas estruturas pré-existentes permitindo afirmar que este padrão de deformação cisalhante, predominantemente transpressivo, é correlacionável com eventos contemporâneos que geram os mesmos tipos de estruturas observadas nas bacias do Médio e Baixo Amazonas (Campos e Teixeira, 1988 e Travassos e Barbosa Filho, 1990).

As mesmas relações discutidas até agora, podem ser abrangidas para o padrão magnético

observado nas imagens digitais dos projetos Coari Oeste e Coari Leste, sendo que este último mostra dois aspectos que merecem ser mencionados.

O primeiro consiste no fato de ser observada uma maior predominância dos lineamentos magnéticos NW-SE em relação aos lineamentos magnéticos NE-SW, se comparados com os demais projetos. Este fato pode ser explicado pela presença de feições estruturais orientadas nesta direção que já foram descritas para esta região, como, por exemplo, as falhas associadas ao Arco de Purus. Neste caso, estas feições lineares magnéticas possivelmente são consequência da presença dessas estruturas geológicas pré-existentes e que, apesar de serem seccionadas e deslocadas pelos lineamentos magnéticos E-W, são feições contínuas e possuem extensões maiores que 100 km. Um outro motivo que resultaria na presença destes lineamentos magnéticos seria um possível estabelecimento, em algumas porções da região coberta por este projeto (principalmente a porção sul), de um regime transtensivo associado ao recobrimento lateral à direita entre as zonas de cisalhamentos E-W dextrais (Fig. 31b), formando assim lineamentos magnéticos na direção NW-SE com extensões menores não apresentando, necessariamente, relações de continuidade entre si.

O segundo aspecto está relacionado aos lineamentos magnéticos correlacionáveis ao Arco de Purus. Partindo do princípio de que estes lineamentos magnéticos são resultado de um contraste de susceptibilidade magnética, decorrente dos processos de falhamento geológico associados à formação desse alto estrutural, e que os lineamentos magnéticos E-W seccionam e deslocam estas feições lineares (NW-SE), podemos afirmar que, possivelmente, o mesmo padrão magnético deve estar presente na Bacia do Amazonas, mostrando que este regime tectônico que se instalou na Bacia do Solimões também afetou a Bacia do Amazonas.

Nesse sentido, as imagens digitais desse projeto mostram uma relação de grande importância para um melhor entendimento da evolução tectônica dessa bacia, o que será discutido mais adiante.

## CAPÍTULO 7

### SUORTE QUANTITATIVO PARA A INTERPRETAÇÃO DO PADRÃO DE FEIÇÕES LINEARES OBSERVADAS NAS IMAGENS DIGITAIS

A interpretação do padrão de feições lineares, baseada no método das imagens digitais de sombreamento, até agora, possui um cunho apenas qualitativo.

Neste capítulo, o objetivo será mostrar quantitativamente que fisicamente, é possível a correlação, feita no capítulo anterior, entre as fontes magnéticas que geram este padrão e os tipos de estruturas geológicas formadas pelo estabelecimento de zonas de cisalhamento transcorrentes.

Esta análise será abordada em duas fases. A primeira terá a finalidade de mostrar, através de modelamentos baseados na superposição de corpos prismáticos bidimensionais, os tipos de estruturas geológicas associadas aos lineamentos magnéticos orientados na direção E-W, já que a presença destas feições magnéticas constitui a base principal da interpretação e integração do padrão magnético observado nas imagens digitais, com as possíveis feições geotectônicas associadas ao quadro estrutural da Bacia do Solimões.

Na segunda fase, utilizaremos os conceitos matemáticos da cross-covariância, para analisar a possibilidade da presença de 'offsets' associados aos lineamentos magnéticos orientados na direção NE-SW, e que podem estar associados à presença de deslocamentos horizontais de feições geológicas estruturais pré-existentes, que foram reativadas durante o estabelecimento das zonas de transcorrência E-W.

#### 7.1 Modelamento Bidimensional

Uma interpretação qualitativa de dados de levantamentos magnéticos requer um modelamento numérico que a apoie. É necessária, portanto, uma análise da possibilidade da interpretação qualitativa estar coerente com as propriedades físicas associadas ao método magnético. Isto será feito através da comparação do campo anômalo observado com um modelo anômalo teórico calculado, e que, por sua vez, represente uma distribuição possível de magnetização presente em subsuperfície.

Neste trabalho, este modelamento será feito através de uma aproximação bidimensional das fontes anômalas, utilizando o algoritmo de Talwani e Hertzler (1964, in: Shuey e Matthews, 1972), cujo modelo é caracterizado pela premissa básica da presença de uma magnetização uniforme

associada a corpos com seções poligonais arbitrárias. A Figura 39 define o sistema de coordenadas  $x-z$  de uma seção transversal a um corpo poligonal de vértices 1-2-3-4.

A magnitude das componentes do campo magnético vertical  $V$  e horizontal  $H$  na origem  $O$  são dados por:

$$V = 2(Q_x - P_z) \quad (5)$$

$$H = 2(P_x + Q_z) \quad (6)$$

onde:

$$Q_x = \iint \frac{J_x 2xz}{(x^2 + z^2)^2} dx dz, \quad (7)$$

$$Q_z = \iint \frac{J_z 2xz}{(x^2 + z^2)^2} dx dz, \quad (8)$$

$$P_x = \iint \frac{J_x(x^2 - z^2)}{(x^2 + z^2)^2} dx dz, \quad (9)$$

$$P_z = \iint \frac{J_z(x^2 - z^2)}{(x^2 + z^2)^2} dx dz, \quad (10)$$

sendo que  $J_x$  e  $J_z$  são as componentes da magnetização em relação aos eixos  $x$  e  $z$ .

Talwani e Heirtzler (1964) consideram  $J_x$  e  $J_z$  como constantes podendo ser removidas de dentro das integrais duplas das equações 6, 7, 8, e 9. Segundo estes autores, podemos expressar essas integrais como a soma de integrais nos 'slabs' horizontais como 1-K-L-2, ou verticais como 1-M-N-2 (Fig. 39), sendo que a adição de 'slabs' em ambos os lados resulta em um polígono.

Assim sendo, considerando o caso particular de magnetização induzida, o módulo do campo anômalo total pode ser expresso por:

$$T = 2F[Q \cos \alpha \sin 2I + P(\cos^2 I \cos^2 \alpha - \sin^2 I)], \quad (11)$$

onde

$$Q = K \int \int \frac{2xz}{(x^2 + z^2)^2} dx dz, \quad (12)$$

$$P = K \int \int \frac{(x^2 - z^2)}{(x^2 + z^2)^2} dx dz, \quad (13)$$

sendo  $K$ ,  $F$  e  $I$ , respectivamente, os valores da susceptibilidade magnética do corpo anômalo, intensidade e inclinação do campo magnético terrestre local, e  $\alpha$  é o ângulo que o eixo  $x$  do corpo anômalo a ser calculado faz com o norte magnético.

O modelamento interativo proposto nesta fase, consiste em um problema instável, do ponto de vista que não há unicidade da solução, já que o método magnético permite a existência de inúmeras soluções alternativas de distribuição de magnetização em subsuperfície, além da solução verdadeira, que satisfazem um ajuste aproximado entre o campo magnético calculado e observado, e representam uma distribuição de magnetização possível em subsuperfície.

Uma forma de diminuir a ambiguidade desta solução, foi utilizar, quando possível, informações disponíveis sobre as profundidades e espessuras médias dos níveis das soleiras (Aires, 1983) e do embasamento (Canha e Ferraz, 1982), além de dados paleomagnéticos dessas fontes (Schult, 1970).

No capítulo quatro, foi discutido que, considerando apenas a presença de magnetização induzida, um corpo anômalo prismático localizado em baixas latitudes é caracterizado pela presença de um baixo magnético acima deste, e altos magnéticos localizados nos limites norte e sul do mesmo.

As Figuras 40, 41 e 42, mostram esta mesma relação para o caso da presença de falhas associadas a um modelo compatível com as estruturas geológicas observadas na Bacia do Solimões, no qual o plano de falha desloca verticalmente níveis de soleiras de diabásio e o embasamento.

No primeiro caso (Fig. 40), observamos que o baixo magnético está localizado acima do bloco (níveis de soleiras e embasamento) soerguido. Porém esta regra não é geral. No caso em que, sobre o bloco soerguido, um dos níveis de soleira esteja ausente (talvez por processos de erosão), observamos que haverá um alto magnético sobre esta região ao invés de um baixo magnético (Fig. 41). A Figura 42 é uma variante do caso anterior, mostrando o caso em que, além de haver uma

ausência de um nível de soleira, o plano de falha vertical promove um contato lateral entre dois níveis diferentes de soleiras, o que conseqüentemente dará também origem a um alto magnético sobre o bloco soerguido.

Seguindo esta analogia, foram modelados dois perfis magnéticos que caracterizam os tipos de superposição de anomalias observadas na Bacia do Solimões, e que estão associadas aos lineamentos magnéticos orientados na direção E-W.

Foi necessário utilizar três tipos de fontes magneticamente distintas. Um para representar fontes rasas associadas aos níveis de soleiras de diabásio, outro para representar o embasamento fracamente magnético, e o terceiro para representar fontes profundas intraembasamento altamente magnetizadas. Em ambos os tipos de fontes foi considerada a presença apenas de magnetização induzida. No caso dos diferentes níveis de soleiras, não foi considerada a presença de mudanças de magnetização com a profundidade, como proposto por Schult (1970).

Desta forma, segue abaixo a descrição de cada modelo.

#### 7.1.1 Modelo 1

O primeiro modelamento foi realizado sobre o perfil magnético da Figura 10. Este perfil, localizado no Projeto Carauari Norte, possuindo uma orientação N/S, mostra, como foi descrito no Capítulo 4, a relação entre altos magnéticos regionais associados a fontes de alta frequência, em contraste com baixos magnéticos regionais onde estas fontes de alta frequência estão relativamente menos presente.

Os parâmetros utilizados para o campo magnético terrestre foram 28000 nT para a intensidade,  $17^\circ$  para a inclinação e  $-7^\circ$  para a declinação. Para os três tipos de fontes, a susceptibilidade magnética utilizada foi 0.006 ucgs para as fontes rasas associadas aos níveis de soleiras, 0.0017 ucgs para fontes associadas ao embasamento e 0.007 ucgs para fontes profundas intraembasamento.

A Figura 43 mostra, portanto, o modelo utilizado para o ajuste aproximado entre o campo magnético anômalo observado e calculado. Podemos a partir deste modelo tirar as seguintes conclusões.

A primeira seria que a presença de altos e baixos magnéticos regionais pode ser explicada a

partir de fontes profundas, associadas a rochas intraembasamento altamente magnetizadas. Assim sendo, um alto e um baixo magnético regional desta magnitude, sempre estarão associados a regiões onde estas fontes se encontram ora em porções mais profundas, ora em porções mais rasas, que por sua vez podem estar associadas a baixos e altos do embasamento, gerados por processos tectônicos que promovem o contato lateral e, conseqüentemente, o contraste de magnetização entre estas duas fontes magneticamente distintas.

O segundo aspecto consiste no fato de que a presença de fontes de alta frequência pode ser associada a regiões onde os níveis de soleiras se encontram deslocados verticalmente por falhas. Geologicamente, o modelo adotado correlaciona a predominância de fontes de alta frequência em regiões associadas a altos magnéticos, a regiões onde a deformação cisalhante foi mais intensa. Fisicamente, este fato promove o aparecimento de comprimentos de onda menores e amplitudes do sinal anômalo maiores do que os observados nas regiões onde estas fontes estão associadas a baixos magnéticos regionais.

Ainda em relação à presença das fontes de alta frequência, associadas a altos magnéticos regionais, foi observado que a ausência do primeiro nível de soleira acima do bloco soerguido é o modelo que melhor ajusta o campo anômalo calculado e observado, para o caso específico deste perfil.

### 7.1.2 Modelo 2

O segundo modelamento foi realizado sobre o perfil magnético mostrado na Figura 11, localizado na porção leste do Projeto Carauari Sul e orientado no sentido N/S. Este perfil também passa sobre um tipo de anomalia magnética bem característica dos mapas de contorno dos projetos aeromagnéticos utilizados.

Os parâmetros utilizados para o campo magnético terrestre foram os mesmos do modelo 1. A susceptibilidade magnética utilizada foi 0.0089 ucs para as fontes rasas associadas aos níveis de soleiras, 0.0007 ucs para fontes associadas ao embasamento e 0.007 ucs para fontes profundas intraembasamento.

O modelo utilizado para o ajuste entre os campos anômalos calculado e observado está representado na Figura 44. Este modelo é importante para confirmar algumas hipóteses sugeridas no

modelo 1. Observa-se, portanto, que também o modelo 2, baseado numa superposição entre fontes profundas intraembasamento altamente magnetizadas e fontes rasas associadas a deslocamentos verticais dos níveis de soleiras através de falhas reversas, é o que melhor explica o padrão de feições magnéticas associadas aos lineamentos magnéticos E-W.

Um outro fato importante mostrado neste modelo, e que também é observado no modelo 1, é que os limites laterais dos corpos anômalos rasos coincidem, por vezes, com os limites das fontes profundas, mostrando portanto que é possível considerar a hipótese de que as superposições entre fontes rasas e profundas estão associadas a feições geológicas limitadas lateralmente pelas mesmas linhas estruturais mestras que, neste caso, são representadas por lineamentos magnéticos orientados na direção E-W.

Fica também demonstrado que as estruturas geológicas que promovem o padrão de feições lineares observadas nestes perfis magnéticos utilizados, e que por sua vez, possuem características representativas do padrão geral observado nas imagens digitais, podem ser enquadradas num regime tectônico transpressivo (comparar as seções das Figuras 43 e 44, com o bloco diagrama da Figura 36(b)).

## 7.2 Utilização dos Conceitos de Cross-Covariância na Identificação de 'Offsets' Associados aos Lineamentos Magnéticos

Nesta fase, demonstraremos a possibilidade da presença de 'offsets' associados aos lineamentos magnéticos E-W e NE-SW, que estão sendo relacionados à presença de deslocamentos com componentes horizontais associados ao estabelecimento de falhas direcionais dextrais orientadas na direção E-W.

Com esta finalidade, foram utilizados os conceitos matemáticos da cross-covariância que fornecem a medida da dependência linear entre dois vetores, segundo um deslocamento ('lag') no domínio do espaço.

Assim sendo, supondo que os vetores  $\vec{f}$  e  $\vec{g}$ , sejam sinais magnéticos anômalos, representados por perfis amostrados em intervalos regulares na forma:

$$\vec{f} = f_0, f_1, \dots, f_{N-1}, \quad (14)$$



$$\vec{g} = g_0, g_1, \dots, g_{N-1}. \quad (15)$$

Então a estimativa da cross-covariância ( Kanasewich, 1975) entre as funções  $f(t)$  e  $g(t)$ , será:

$$C(L) = \frac{1}{N} \sum_{t=0}^{N-L-1} f_t g_{t+L}, \quad (16)$$

onde,  $L = 0, 1, \dots, N - 1$ , é o deslocamento no domínio do espaço entre as funções  $f(t)$  e  $g(t)$  para o calculo da cross-covariância.

Na Figura 45, são considerados os dois casos possíveis de ocorrer durante a análise da presença de 'offsets' nos lineamentos magnéticos através da equação (14). Nos dois casos são utilizados perfis nos lados opostos do referencial do 'offset'. O referencial do 'offset' consiste no possível plano de deslocamento horizontal entre as curvas anômalas. No presente caso, ele coincidirá com a localização de um lineamento magnético orientado na direção E-W e delimitado nas imagens digitais, seccionando e deslocando lineamentos magnéticos orientados na direção NE-SW.

O procedimento utilizado foi o de calcular inicialmente, o deslocamento ' $L_i$ ', no domínio do espaço, que fornecesse o maior valor da cross-covariância entre os perfis localizados abaixo (perfil 1 e perfil 2), adjacente ( perfil 2 e perfil 3), e acima (perfil 3 e perfil 4) do referencial do 'offset'. Em seguida, foram calculados os ângulos  $\Theta_1$  e  $\Theta_2$ , que representam, respectivamente, a dependência linear entre os pares de perfis 1-2, e 3-4. A partir do valor desses ângulos, o último passo foi projetar para cada par de perfil uma reta até a interseção com o referencial de 'offset', sendo que de acordo com a forma no qual estas interseções se apresentam, é constatada ou não a presença de um 'offset'.

No primeiro caso (Fig. 45a), é mostrada a situação em que é caracterizada a presença de um 'offset', ou seja, as interseções das retas, associadas aos dois pares de perfis correlacionados com o referencial de 'offset', não coincidem entre si, sendo que a diferença entre estas interseções, medida ao longo do referencial de 'offset', será igual ao valor do 'offset' entre os pares de anomalias analisadas. No segundo caso (Fig. 45b), é mostrada a situação em que há coincidência entre as retas associadas aos dois pares de perfis correlacionados, não sendo, portanto, caracterizada a presença de um 'offset' entre os pares de anomalias analisadas.

A Figura 46 mostra uma sub-área localizada no Projeto Carauari Sul, onde se observa um padrão de feições magnéticas onde foi aplicada esta metodologia. Observa-se que foi possível delimitar a presença de um 'offset' da ordem de 9 km de extensão nesta região. Um outro fato interessante é que, neste caso, há uma mudança considerável, da ordem de  $9^\circ$ , entre os ângulos  $\Theta_1$  e  $\Theta_2$ , associados a cada par de perfis correlacionados. Na Figura 47 estão representados graficamente os valores da cross-covariância entre os perfis correlacionados, com relação ao deslocamento ' $L_i$ '.

A demonstração, acima descrita, da possibilidade de se caracterizar a presença de 'offsets' a partir das feições lineares magnéticas, observadas nos dados aeromagnéticos da Bacia do Solimões, levou o presente autor a utilizar esta análise em outra sub-área, localizada no Projeto Jutai, onde ficou caracterizado nas imagens digitais que os limites entre as zonas de altas frequências e baixas frequências são definidos por lineamentos magnéticos orientados na direção NE-SW, e que estes estão seccionados e deslocados no sentido dextral por lineamentos magnéticos orientados na direção E-W.

Desta forma, a sub-área escolhida (Fig. 48a) representa o limite leste de uma feição romboédrica descrita nos Capítulos 5 e 6, e associados ao Alto Transpressional do Eirunepé.

É mostrado na Figura 48b, que realmente é possível delimitar um 'offset' nesta região com extensão de aproximadamente 4 km e que, nesta região, também há presença de mudanças entre os ângulos  $\Theta_1$  e  $\Theta_2$ , associados a cada par de perfis correlacionados. Na Figura 49 estão representados graficamente os valores da cross-covariância entre os perfis correlacionados desta área com relação aos deslocamentos  $L_i$ .

Este último exemplo é de vital importância, já que nos permite agora sugerir com argumentos quantitativos de que, se os limites entre as zonas de alta frequência e baixa frequência, coincidem com as direções dos lineamentos magnéticos E-W e NE-SW, sendo que estes últimos estão seccionados e deslocados dextralmente, então podemos considerar este padrão de feições lineares magnéticas como consequência da interação de mais de um evento tectônico, que geram estruturas geológicas na forma demonstrada pelos modelamentos do item anterior.

Seguindo esta analogia, no próximo capítulo será feita uma integração da interpretação realizada até agora com o quadro tectônico evolutivo da Bacia do Solimões.

## CAPÍTULO 8

### INTEGRAÇÃO DA INTERPRETAÇÃO DO PADRÃO ESTABELECIDO PELAS FEIÇÕES LINEARES MAGNÉTICAS, COM O PROCESSO TECTÔNICO EVOLUTIVO DA BACIA DO SOLIMÕES

Nos capítulos anteriores, foi discutido e demonstrado que é possível considerar o padrão de feições lineares magnéticas, interpretado nas imagens digitais, como gerado a partir do estabelecimento de mais de um evento tectônico, os quais promoveram contrastes laterais de susceptibilidade magnética entre corpos altamente magnetizados, através de feições geológicas estruturais.

O exemplo no qual foi baseada esta hipótese, consiste no fato de os limites laterais, que diferenciam as zonas caracterizadas pela presença de fontes de alta e baixa frequência, e que por sua vez, coincidem com a presença de lineamentos magnéticos orientados na direção NE–SW, estarem deslocados (possuem 'offset') dextralmente na direção E–W.

Portanto, torna-se necessária uma interpretação integrada destas feições lineares magnéticas, com os eventos tectônicos que se instalaram antes e durante o estabelecimento da Bacia do Solimões. Estes processos tectônicos estão intimamente associados à evolução estrutural da região amazônica, desde o Pré–Cambriano até o Cenozóico.

#### 8.1 Evolução Estrutural da Amazônia

Segundo alguns autores, entre eles Wanderley Filho (1991), Costa e Hasui (1991) e Bemerguy e Costa (1991), as estruturas pré–cambrianas presentes no Craton Amazônico (Almeida, 1967) exerceram forte controle nos processos tectônicos que se instalaram na região amazônica através do Fanerozóico.

Estas estruturas, formadas no Pré–Cambriano, estão associadas a dois eventos tectônicos principais. O primeiro, foi responsável pela instalação das linhas mestras estruturais NW–SE e NE–SW do arcabouço tectônico regional durante o Arqueano (Fig. 50), devido à instalação dos vários núcleos de terrenos granito–'grenstones'. Segundo Costa e Hasui (1991), estes núcleos são contornados por cinturões de cisalhamento, com caráter de cavalgamento oblíquo, delineando a estruturação geral dada por blocos crustais justapostos. Estes autores consideram que os deslocamentos associados ao processo de cisalhamento foram da ordem de dezenas de quilômetros

nas zonas de cavalgamento, promovendo assim o alçamento de rochas granulíticas da crosta inferior para níveis rasos e causando, conseqüentemente, espessamento crustal ao longo de faixas.

O segundo evento proporcionou a formação de diversas bacias extensionais durante o Proterozóico Médio. Na região NW da Amazônia, esta estruturação está associada a um eixo extensional N-S, que deu origem à formação de falhas normais E-W e falhas de transferência submeridianas, enquanto que, na região da Amazônia Oriental, este evento evoluiu a partir de um eixo extensional NE-SW, que formou falhas normais WNW-ESE e falhas de transferência NE-SW (Fig. 51).

As Bacias do Solimões e Amazonas se instalaram durante o Paleozóico através da atuação de um eixo extensional NW-SE, que promoveu a reativação das linhas de fraqueza dos cavalgamentos dúcteis, vinculados aos cinturões Pré-Cambrianos. Desta forma, as zonas de fraqueza antigas NE-SW e NW-SE foram reativadas, respectivamente, em falhas normais e falhas de transferência (Fig. 52).

A movimentação associada às falhas de transferência, foi responsável pela compartimentação da região amazônica em quatro blocos estruturais distintos, com destaque para a zona compartimental conhecida como Arco de Purus, que funcionou como uma zona de transferência separando as bacias do Solimões e Amazonas.

Durante o Mesozóico, o processo de fragmentação do megacontinente Gondwana ficou registrado pela formação de falhas normais NE-SW e NNE-SSW e falhas de transferência NW-SE (Fig. 53), acompanhado da instalação de rochas ígneas e sedimentares. Caputo e Silva (1990) e Wanderley Filho (1991) incluem também uma fase compressiva pós-diabásio durante o Mesozóico, formando falhas transcorrentes ENE-WSW.

A tectônica cenozóica da região amazônica é um assunto que recentemente tem sido muito discutido por alguns autores. A este período geológico é atribuída a formação de estruturas essencialmente transcorrentes dextrais decorrentes de extensão NE-SW induzida por um binário E-W dextral (Costa e Hasui, 1991; Costa et. al., 1991, Bemerguy e Costa, 1991).

Bemerguy e Costa (1991), partindo da análise sobre a evolução do sistema de drenagem da Amazônia com o arcabouço estrutural desta região, destacam pelo menos dois movimentos tectônicos principais no Cenozóico.

O primeiro evento, mais antigo, cuja atuação é datada do Eoceno ao Oligoceno, marca a fase mais intensa de colisão entre as placas Sul-Americana e Nazca, resultando na instalação da Cadeia Andina (Fig. 54).

O segundo evento atuou a partir do Mioceno através da propagação de falhas transcorrentes projetadas ao longo do eixo das bacias sedimentares do Solimões e Amazonas (Fig. 55).

Travassos e Barbosa Filho (1990) documentam bem esta fase de deformação na porção leste da Bacia do Amazonas, com base em dados sísmicos em sequências sedimentares terciárias. Segundo estes autores, a compartimentação estrutural ocorrida na região decorreu da atuação de esforços oblíquos convergentes de direção geral E-W sobre superfícies de fraqueza do embasamento, o que promoveu uma deformação cisalhante, cujo estilo estrutural se caracterizou por um notável conjunto de dobras assimétricas, associadas a falhas reversas, dispostas num padrão 'en échelon', seguindo a orientação de lineamentos pré-existentes de direção geral NE-SW. Destacam-se também outros autores que discutem o mesmo padrão estrutural Cenozóico para a região amazônica, entre eles Campos e Teixeira (1988), e Wanderley Filho (1991).

## 8.2 Relações com as Feições Lineares Magnéticas

O quadro estrutural evolutivo da região amazônica mostra que as principais linhas de fraqueza orientadas nas direções NE-SW, NW-SE e E-W foram inicialmente criadas através da atuação de processos tectônicos no Pré-Cambriano e que, posteriormente foram, em grande parte, reativadas pelo estabelecimento de regimes tectônicos durante o Paleozóico, Mesozóico e Cenozóico.

A primeira relação a ser constatada entre os lineamentos magnéticos observados nas imagens digitais é que estes são perfeitamente correlacionáveis com o quadro evolutivo tectônico da Bacia do Solimões e, portanto, é possível associar as propriedades físicas detectadas nesta região pelo método magnético como consequência da instalação de feições geológicas estruturais.

Fazendo uma analogia da tectônica pré-cambriana com estes lineamentos magnéticos, observamos que um fato relevante dessa fase está relacionado à possibilidade de associar as fontes magnéticas profundas intraembasamento, sugeridas nos modelos bidimensionais descritos no capítulo anterior, como responsáveis pela presença de altos e baixos magnéticos regionais, aos corpos granulíticos da crosta inferior que se encontram em níveis rasos, devido ao processo de es-

ressamento crustal promovido pelo estabelecimento de um regime de deformação, associado a um cisalhamento de cavalgamento dúctil (Costa e Hasui, 1991).

Portanto, é considerado neste trabalho o quadro estrutural formado por este evento tectônico Arqueano, assim como as sucessivas fases de reativações dessas zonas de fraqueza pré-cambrianas ao longo da evolução tectônica fanerozóica da Bacia do Solimões, como responsáveis pela presença de feições lineares magnéticas associadas a anomalias regionais e caracterizadas por grandes comprimentos de onda. O contraste lateral de susceptibilidade magnética neste modelo adotado é representado pelo contato lateral, através de planos de falhas, entre os cinturões granulíticos e os vários núcleos de terrenos granito-'greenstone' que fazem parte do embasamento da bacia.

Em relação às feições lineares magnéticas associadas às fontes de alta frequência, já foi discutido no texto que elas se enquadram num evento tectônico pós-diabásio. Ficou demonstrado, através de modelamentos, que estas fontes podem ser associadas a corpos rasos representados pelos níveis de soleiras de diabásio.

Foi observado também que os limites das fontes de alta frequência por vezes coincidem com os limites das fontes profundas intraembasamento, mostrando que é possível que o tectonismo transcorrente, que proporcionou o estabelecimento do padrão final dos lineamentos magnéticos, foi fortemente condicionado por estruturas de fraqueza pré-existentes, como as pré-cambrianas, paleozóicas e mesozóicas.

Este padrão, observado nas imagens digitais, é interpretado como resultado de um regime predominantemente transpressivo, gerando um quadro estrutural representado pelo recobrimento lateral entre zonas transcorrentes dextrais orientadas na direção E-W, que possui uma grande correlação com o tectonismo Terciário proposto por Travassos e Barbosa Filho (1990), e Bemerguy e Costa, 1991.

Um fato de grande relevância, e que pode apoiar esta hipótese, é observado nas imagens digitais do Projeto Coari Leste, onde foi mostrado que as feições lineares magnéticas E-W seccionam e deslocam lineamentos magnéticos NW-SE associados às falhas que compõem o Arco de Purus, permitindo assim correlacionar este padrão de feições lineares com o mesmo evento proposto por estes autores.

Um outro aspecto importante é que os deslocamentos ('offsets') associados aos lineamentos magnéticos NE-SW, que localmente correspondem aos limites entre regiões diferenciadas magneticamente, pela predominância relativa de fontes de alta e baixa frequência, podem também ser considerados como consequência deste tectonismo Cenozóico que, por sua vez, foi fortemente condicionado por zonas de fraqueza antigas. Isto porque a presença destas duas regiões, magneticamente distintas, foi explicada por um modelo que considerava a presença de um baixo do embasamento já existente, o que proporcionou que as fontes rasas sobrepostas sobre esta região fossem mais intensamente deformadas, em contraste com regiões onde o embasamento se encontrava em níveis mais rasos, oferecendo assim mais resistência aos esforços cisalhantes que, por sua vez, deslocaram os limites entre estas duas regiões.

Uma questão que ainda pode ser abordada é o fato de, na Bacia do Solimões, o mesmo padrão de feições estruturais consideradas neste trabalho para explicar o padrão de feições lineares magnéticas observadas nas imagens digitais ser considerado por alguns autores como consequência de um tectonismo Juro-Cretáceo (Caputo e Silva, 1990). O fato é que se for considerada esta hipótese, como podemos explicar que o mesmo padrão de feições estruturais é definido na Bacia do Amazonas como gerado a partir de um tectonismo Terciário ?

Vale lembrar que, na Bacia do Solimões, um estudo ao longo de perfis sísmicos processados para evidenciar estruturas geológicas em sequências cenozóicas, como o realizado por Travassos e Barbosa Filho (op. cit.) na Bacia do Amazonas, ainda não é conhecido na literatura geológica.

Esta questão é de vital importância, já que é comprovada a presença de hidrocarbonetos nesta bacia associados a feições estruturais mesozóicas. Uma hipótese, portanto, pode ser considerada: a de que existem dois eventos transcorrentes E-W, como considerado por Wanderley Filho (1991), um Mesozóico conforme o modelo proposto por Caputo e Silva (op. cit.) e outro Cenozóico que foi fortemente controlado por zonas de fraqueza antigas. Vale ressaltar que o método magnético não possibilita diferenciar estes dois eventos tectônicos (Mesozóico e Cenozóico) e que a presença do tectonismo Cenozóico na Bacia do Solimões é defendida neste trabalho devido a grande correlação com o modelo proposto por Travassos e Barbosa Filho (op. cit.), e que esta correlação é considerada no fato da presença do padrão magnético discutido neste trabalho estarem presentes na região do Arco de Purus.

Esta hipótese permite considerar que os lineamentos magnéticos em questão sejam reflexos também da localização de estruturas Pré-Cambrianas, Paleozóicas, e Mesozóicas. Um exemplo deste fato, é a grande relação destes lineamentos magnéticos, com os 'trends' estruturais do Urucu, e Juruá.



## CAPÍTULO 9

### CONCLUSÕES

O método das imagens de sombreamento mostrou ser uma ferramenta importante para o estudo de feições lineares associadas a dados que refletem o campo potencial magnético anômalo terrestre.

A sua aplicação em dados aeromagnéticos da Bacia do Solimões possibilitou evidenciar aspectos relevantes entre os lineamentos magnéticos E-W, NE-SW e NW-SE, cujas relações entre si definem o padrão magnético geral observado nesta região, e que até então, era pouco estudado, devido principalmente a grande complexidade induzida pelas características do campo magnético, associado a regiões localizadas em baixa latitude.

A interpretação das imagens digitais referentes aos projetos aeromagnéticos utilizados possui grande correlação com o quadro tectônico evolutivo da Região Amazônica. Desta forma, é mostrado que o padrão definido pelas três direções de lineamentos magnéticos (E-W, NE-SW e NW-SE) pode ser associado aos processos de desenvolvimento de zonas de cisalhamento transcorrentes dextrais, orientadas preferencialmente na direção E-W, durante o Mesozóico e Cenozóico, e que o estabelecimento destas zonas de cisalhamento foi fortemente condicionado pela presença de linhas de fraqueza pré-existentes (pré-cambrianas, paleozóicas).

A forte correlação destes lineamentos magnéticos com os 'trends' do Juruá e do Urucu, que estão associados aos processos de trapeamento de hidrocarbonetos nesta região, pode aumentar as perspectivas exploratórias desta bacia, já que é mostrado que o mesmo padrão estabelecido por estes 'trends' é observado em todas as imagens digitais dos projetos aeromagnéticos utilizados, através da presença de lineamentos magnéticos bem definidos.

## AGRADECIMENTOS

Ao Prof. Dr. Douglas Patrick O'Brien, pela orientação e estímulo.

Ao Prof. Dr. João Batista Sena Costa pelo incentivo, sugestões e, principalmente, pela orientação durante a fase de integração da interpretação das imagens digitais com o quadro tectônico evolutivo da Bacia do Solimões.

Ao Dr. Fernando Pellon de Miranda, por aceitar fazer parte da comissão examinadora, e pelas sugestões e revisão crítica do texto, visando o engrandecimento do conteúdo deste trabalho.

Ao Prof. Jorge Wilson Delgado Leão pela frequente disponibilidade e apoio computacional.

Ao convênio UFFa/PETROBRAS/FADESP/CAPES/FINEP/CNPq pelo apoio financeiro, fornecimento dos dados utilizados e concessão da bolsa de estudo.

Aos amigos do Curso de Pós-Graduação em Geofísica da UFFa, que de uma forma direta ou indireta ajudaram neste trabalho.

**REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS**

- AIRES, J. R. 1983. Estudo do vulcanismo básico da Bacia do Amazonas. Rio de Janeiro, PETROBRÁS/DEPEX/CENPES, no. 673-04142, 58 p. (Rel. Int.)
- ALMEIDA, F. F. M. 1967. Origem e Evolução da Plataforma Brasileira. Rio de Janeiro, DGM/DNPM. 36p. (Boletim 241).
- APOLUCENO NETO, A. F. & TSUBONE, K. 1988. A descoberta de petróleo do Rio Urucu, Bacia do Solimões. In: CONGRESSO BRAS. GEOL., 35, Belém, 1988. Anais... Belém, SBG. v.6, p. 2416-2427.
- BEMERGUY, R. L. & COSTA, J. B. S. 1991. Considerações sobre a evolução do sistema de drenagem da Amazônia e sua relação com o arcabouço tectônico estrutural. (no prelo).
- BOA HORA, M. P. P.; CASTRO, P. J. M.; GUIMARÃES, P. P.; LATGÉ, M. A. L. ; ARAÚJO, E. M. S. 1984. Mapa de interpretação qualitativa do campo magnético total - Projetos Carauari, Jutaí e Acre. Rio de Janeiro, PETROBRÁS/SEMEPO. (Rel. Int.).
- BRIGGS, I. C. 1974. Machine contouring using minimum curvature. Geophysics, 39 (1) : 39-48.
- BROOME, J. H. 1990. Generation and interpretation of geophysical images with examples from the Rae Province, Northwestern Canada Shield. Geophysics 55 (8) : 977-997.
- CAMPOS, J. N. P. & TEIXEIRA, L. B. 1988. Estilo tectônico da bacia do Baixo Amazonas. In: CONGRESSO BRAS. GEOL., 35, Belém, 1988. Anais... Belém, SBG. v. 5, p. 2161-2172.
- CANHA, R. P. & FERRAZ, A. E. P. P. D. 1982. Projeto Carauari - Interpretação dos dados aeromagnetométricos. Rio de Janeiro, PETROBRÁS/DEPEX, n. 103-2392. (Rel. Int.).
- CAPUTO, M. V. 1984. Stratigraphy, Tectonics, Paleoclimatology and Paleogeography of Northern Basins of Brazil. A Dissertation submitted in partial satisfaction of the requirements of the degree of Doctor of Philosophy in Geology. Santa Barbara, University of California Santa Barbara. 586 p.

- CAPUTO, M. V. 1985. Origem do Alinhamento Estrutural do Juruá – Bacia do Solimões. In: SIMPÓSIO DE GEOLOGIA DA AMAZÔNIA, 2, Belém, 1985. Anais... Belém, SBG. p. 242-258.
- CAPUTO, M. V. & SILVA, O. B. 1990. Sedimentação e tectônica da Bacia do Solimões. In: PETROBRÁS. Origem e evolução de Bacias sedimentares. Rio de Janeiro. p. 169-193.
- CHRISTIE-BLICK, N. & BIDDLE, K. T. 1985. Deformation and basin formation along strike-slip faults. In: BIDDLE, K. T. & CHRISTIE - BLICK, N. eds. Strike-slip deformation, basin formation and sedimentation. p. 1-34 (Society of Economic Paleontologists and Mineralogists. Special Publication, 37).
- CORDANI, U. G.; BRITO NEVES, B. B.; FUCK, H. A.; PORTO, R.; THOMAZ FILHO, A. ; CUNHA, F. M. B. 1983. Estudo integrado do Pré-Cambriano com os eventos tectônicos das bacias sedimentares brasileiras. Rio de Janeiro, PETROBRÁS/CENPES/DIVEX/SINTEP. 70 p. (Série Ciência Técnica-Petróleo, 15).
- COSTA, J. B. S. & HASUI, Y. 1991. O quadro geral da evolução tectônica da Amazônia. (no prelo).
- COSTA, J. B. S.; IGREJA, H. L. S.; BORGES, M. S. ; HASUI, Y. – A tectônica mesozóico-cenozóica do norte do Brasil. (no prelo).
- CROWEL, J. C. 1974. Origin of Late Cenozoic basins in southern California. In: DICKINSON, W. R. ed. Tectonics and Sedimentation. p. 190-204 (Society of Economic Paleontologists and Mineralogists. Special Publication, 22).
- DODS, S. D. ; TESKEY, D. J. ; HOOD, P. J. 1985. The new series of 1:1000000 – scale magnetic anomaly maps of the Geological Survey of Canada : Compilation techniques and interpretation. In: HINZE, W. ed. The utility of regional gravity and magnetic anomaly maps. Tulsa, Society of Exploration Geophysicists. p. 69-87.
- ESTEVES, F. R. 1982. Exploração na área do Juruá. In: CONGRESSO BRASILEIRO DE PETRÓLEO, 2, Rio de Janeiro, 1982. Anais... Rio de Janeiro, CNP. p. 24-46.

- ESTEVEES, F. R. 1984. Mecanismo das placas da América Central–Pacífico Sul e sua influência na evolução tecto–sedimentar da Bacia do Alto Amazonas durante o Mesozóico. Manaus, PETROBRÁS/DENOC. 14 p. (Rel. int.).
- GUINNESS, E. A.; ARVIDSON, R. E.; LEFF, C. E.; EDWARDS, M. H.; BINDSCHADLER, D. L. 1983. Digital Image Processing Applied to Analyses of Geophysical and Geochemical Data for Southern Missouri. *Economic Geology*, 78: 654–663.
- HARDING, T. P.; VIERBUCHEN, R. C.; CHRISTIE–BLICK, N. 1985. Structural styles, plate tectonic settings, and hydrocarbon traps of divergent (transtensional) wrench faults. In: BIDDLE, K. T. & CHRISTIE – BLICK, N. eds. Strike–Slip deformation, basin formation and sedimentation. p. 51–78 (Society of Economic Paleontologists and Mineralogists Special Publication, 37).
- HASUI, Y. & COSTA, J. B. S. 1991. Zonas e cinturões de cisalhamento. Belém, Ed. Universitária/UFPA. 144 p.
- HORN, B. K. P. & BACHMAN, B. L. 1978. Using synthetic images to register real images with surface models. *Commun, Assoc. for Compt. Mach.*, 21: 914–924.
- KANASEWICH, E. R. 1975. Time sequence analysis in Geophysics. Edmonton, The University of Alberta Press. 364 p.
- KOWALIK, W.S. & GLENN, W.E. 1987. Image Processing of Aeromagnetic Data and Integration with Landsat Images for Improved Structural Interpretation. *Geophysics*, 52 (7): 875–884.
- LEITE, L. W. B. & LEÃO J. W. D. 1985. Ridge regression applied to the inversion of two-dimensional aeromagnetic anomalies. *Geophysics*, 50 (8) : 1294–1306.
- MACHADO, S. A. M. 1990. Estudo do comportamento das feições lineares observadas em dados aeromagnéticos da Bacia do Paraná. Belém. 144 p. (Tese de Mestrado, UFPA).
- MUHLMANN, H.; PERES, W. E. ; FRANCISCO, C. 1982. Interpretação sísmica do comportamento estrutural da Bacia do Acre. Rio de Janeiro, PETROBRÁS. (Rel. Int.).

- PORSCHÉ, E. 1985. Tectônica da faixa de dobramentos do Juruá, Bacia do Alto Amazonas – um modelo estrutural. Ouro Preto. 124 p. (Tese de Mestrado da Univ. Fed. Ouro Preto – MG).
- QUADROS, L., P. 1988. Zoneamento bioestratigráfico do Paleozóico Inferior e Médio (seção marinha) da Bacia do Solimões. Bol. Geociências da PETROBRÁS, 1 (2): 95–109.
- RAMSAY, J., G., & HUBER, M., T. 1983. The techniques of modern structural geology. New York, Academic Press, v. 1.
- SCHNEIDER, R. L. & CARNEIRO, R. G. 1976. Reavaliação das possibilidades petrolíferas da Bacia do Alto Amazonas. Rio de Janeiro, PETROBRÁS/SIEX. (Rel. Int.).
- SCHULT, A. 1970. Natural Magnetization of Deep Core Samples of Basaltic Rocks from Brasil. Zeitschrift für Geophysik, 36: 267–286.
- SHUEY, R. T. & MATTEWS, J. E. 1972. Two-dimensional modeling with inhomogeneously magnetized bodies. Geoprospection, 10 : 229–238.
- SILVA, O. B. 1987. Análise da Bacia do Solimões (revisão litoestratigráfica, magmatismo e geoquímica). Ouro Preto. 118 p. (Tese de Mestrado da Univ. Fed. Ouro Preto – MG).
- SILVA, O. B. 1988. Revisão estratigráfica da Bacia do Solimões. In: CONG. BRAS. GEOL., 35, Belém, 1988. Anais... Belém, SBG. v. 3, p. 2428–2438.
- SYLVESTER, M. R. & SMITH, R. R. 1976. Tectonic transpression and basement-controlled deformation in San Andreas Fault Zone, Salton Trough, California. American Association of Petroleum Geologists Bulletin, 60 : 1976–2081.
- SZATMARI, P. 1981. Tectonismo Herciniano–Andino e a Bacia Amazônica. Rio de Janeiro, PETROBRÁS/CENPES. 56 p. (Rel. Int.).
- SZATMARI, P. 1983. Amazon rift and Pisco Juruá–fault : their relation to the separation of North America from Gondwana. Geology, 2 : 300–304.
- SZATMARI, P. 1984. Tectonismo da faixa de dobramento do Juruá. In: SYMPOSIUM AMAZÔNICO, 2, Manaus, 1984. Anais... Manaus. p. 117–128.

- SZATMARI, P.; SIMÕES, I. A. ; CARVALHO, R. S. 1975. Evaporitos da Bacia do Amazonas. Rio de Janeiro, PETROBRÁS/DEPRO/DIVEX. 119 p. (Rel. Int.).
- TALWANI, M. & HEIRTZLER, J. 1964. Computation of magnetic anomalies caused by two-dimensional structures of arbitrary shape. In: Computers in the Mineral Industries, 1. Stanford Univ. Publ. Geol. Soci., 9 (1) : 464-480.
- TCHALENKO, J. S. & AMBRASEYS, N. N. 1970. Structural analysis of the Dasht-e Bayas (Iran) earthquake fractures. Geological Society of America Bulletin, 81 : 41-60.
- TRAVASSOS, W. A. S. & BARBOSA FILHO, C. M. 1990. Tectonismo Terciário na área do Rio Tapajós, Bacia do Amazonas. Boletim de Geociências da PETROBRÁS, 4 (3) : 221-340.
- WANDERLEY FILHO, J. 1991. Evolução estrutural da bacia do Amazonas e sua relação com o embasamento. Belém. 125 p. (Tese de Mestrado, UFPa).
- WILCOX, R. E. 1973. Basin wrench tectonics. American Association of Petroleum Geologists Bulletin, 57 : 74-96.
- WOODCOCK, N. H. & FISCHER, M. 1986. Strike-slip duplexes. Journal of Structural Geology, 8 : 725-735.

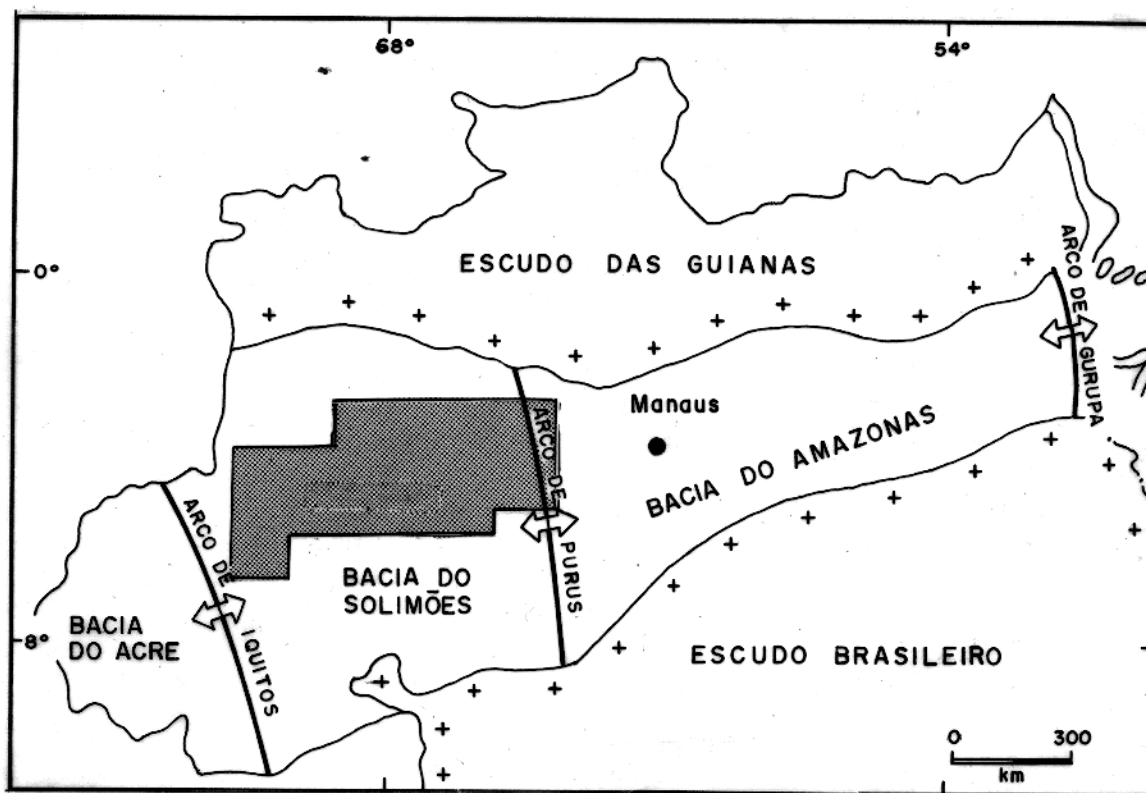


Figura 1 – Localização da área estudada (região sombreada) na Bacia do Solimões, e os principais elementos tectônicos da Região Amazônica (segundo Caputo e Silva, 1991).

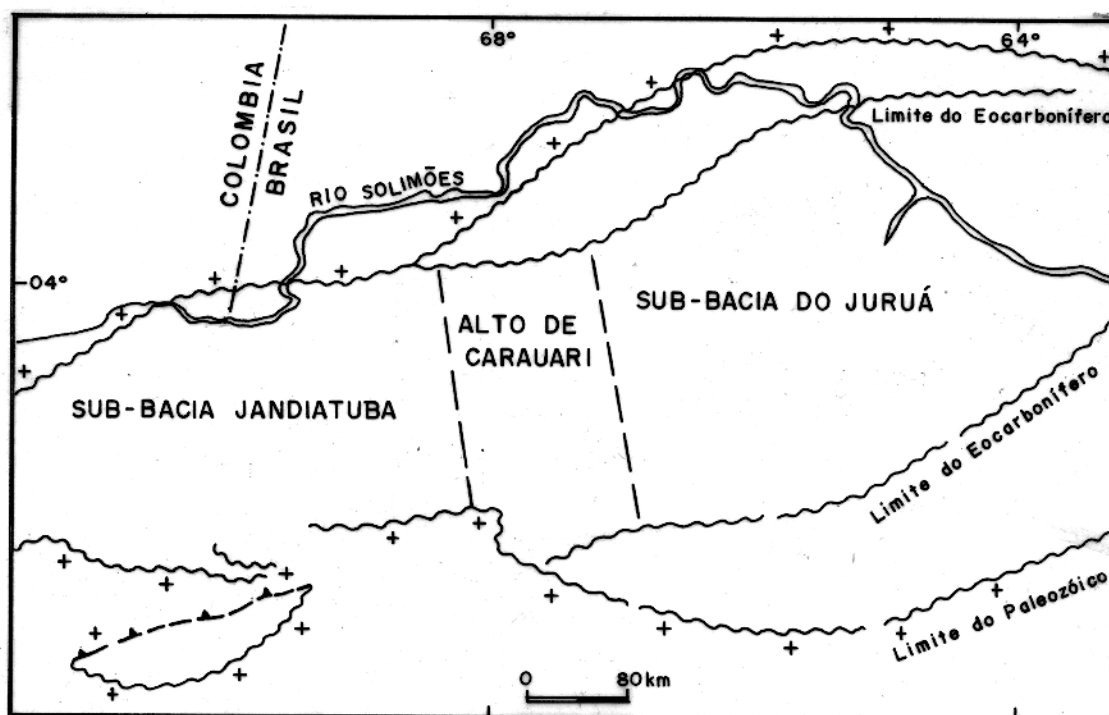


Figura 2 – Principais feições morfo-estruturais da Bacia do Solimões (segundo Caputo e Silva, 1990).



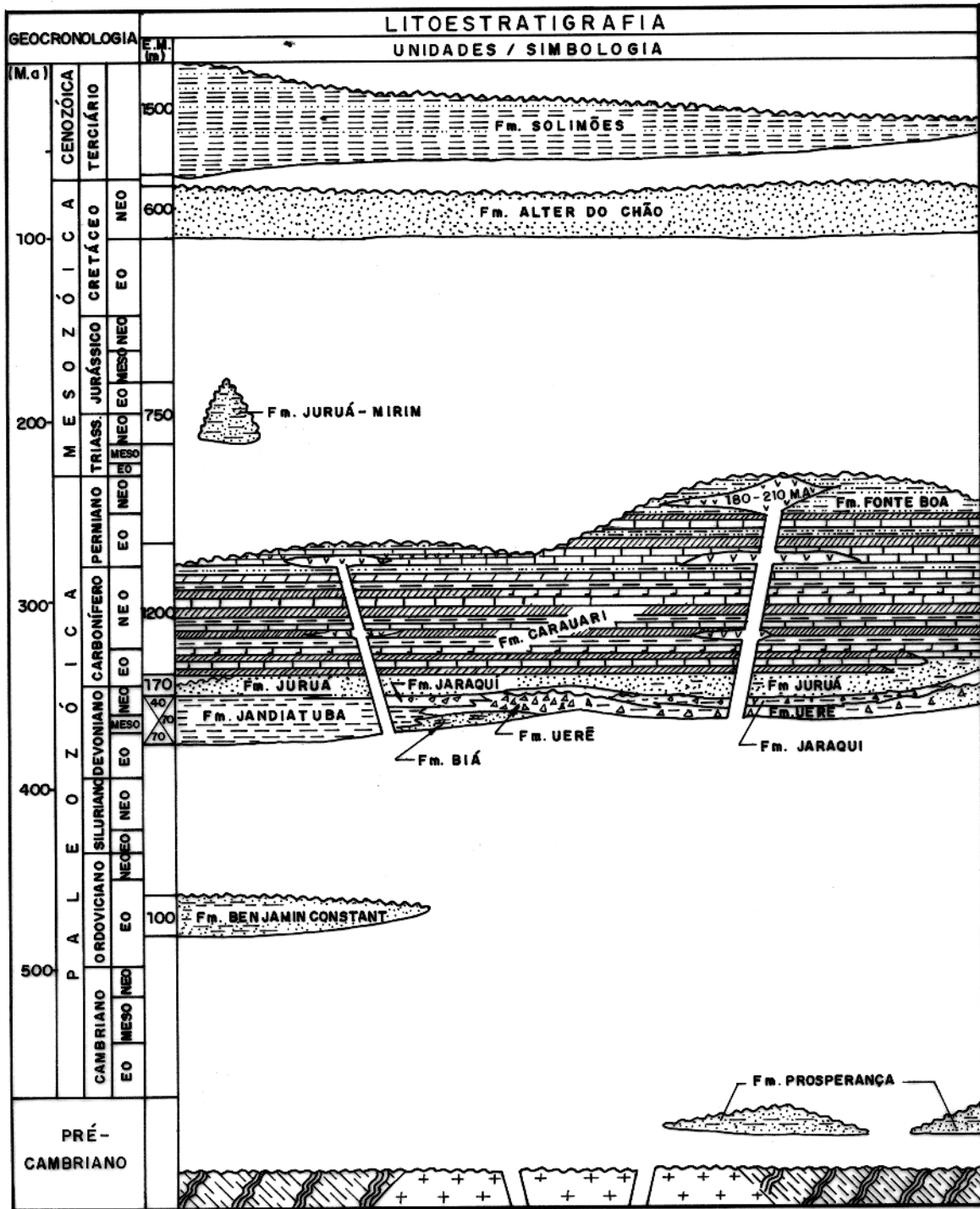


Figura 3 – Carta litoestratigráfica da Bacia do Solimões (Silva, 1987)



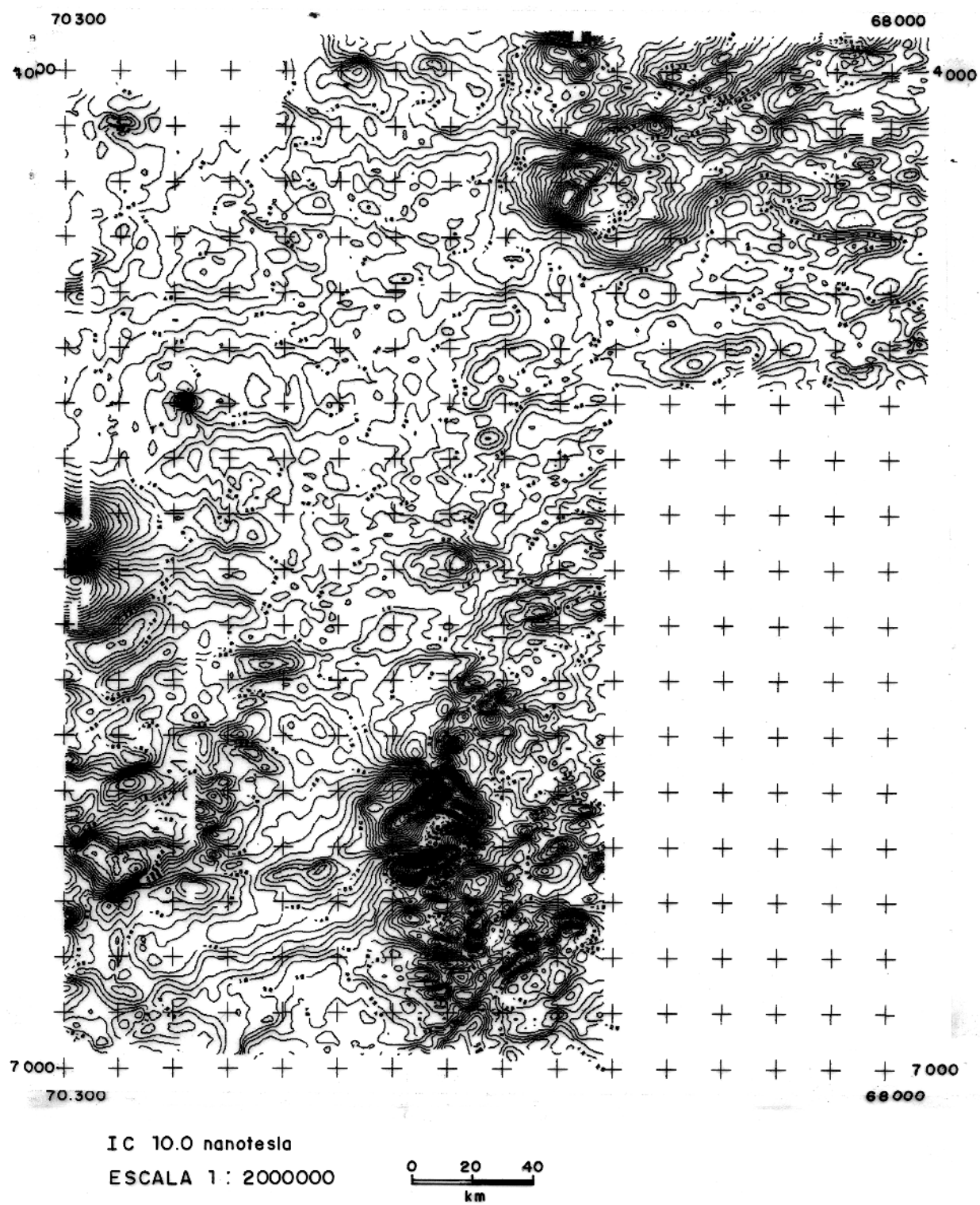
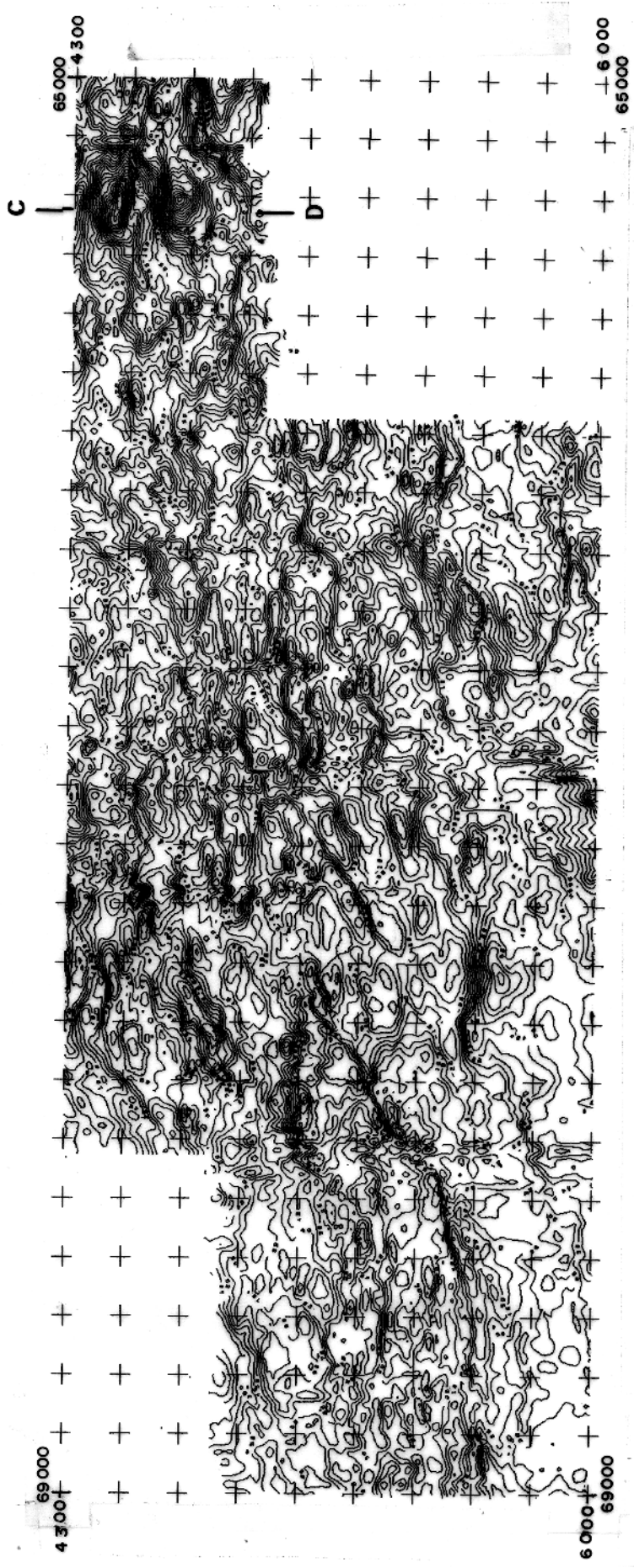


Figura 5 – Mapa de contorno do campo magnético anômalo referente ao projeto Jutai.



CI 10.0 nanotesla

ESCALA 1 : 2000000



Figura 6 - Mapa de contorno do campo magnético anômalo referente ao projeto Carauari-Sul. C-D significa as posições iniciais e finais de um perfil magnético orientado na direção N/S, (fig. 11).

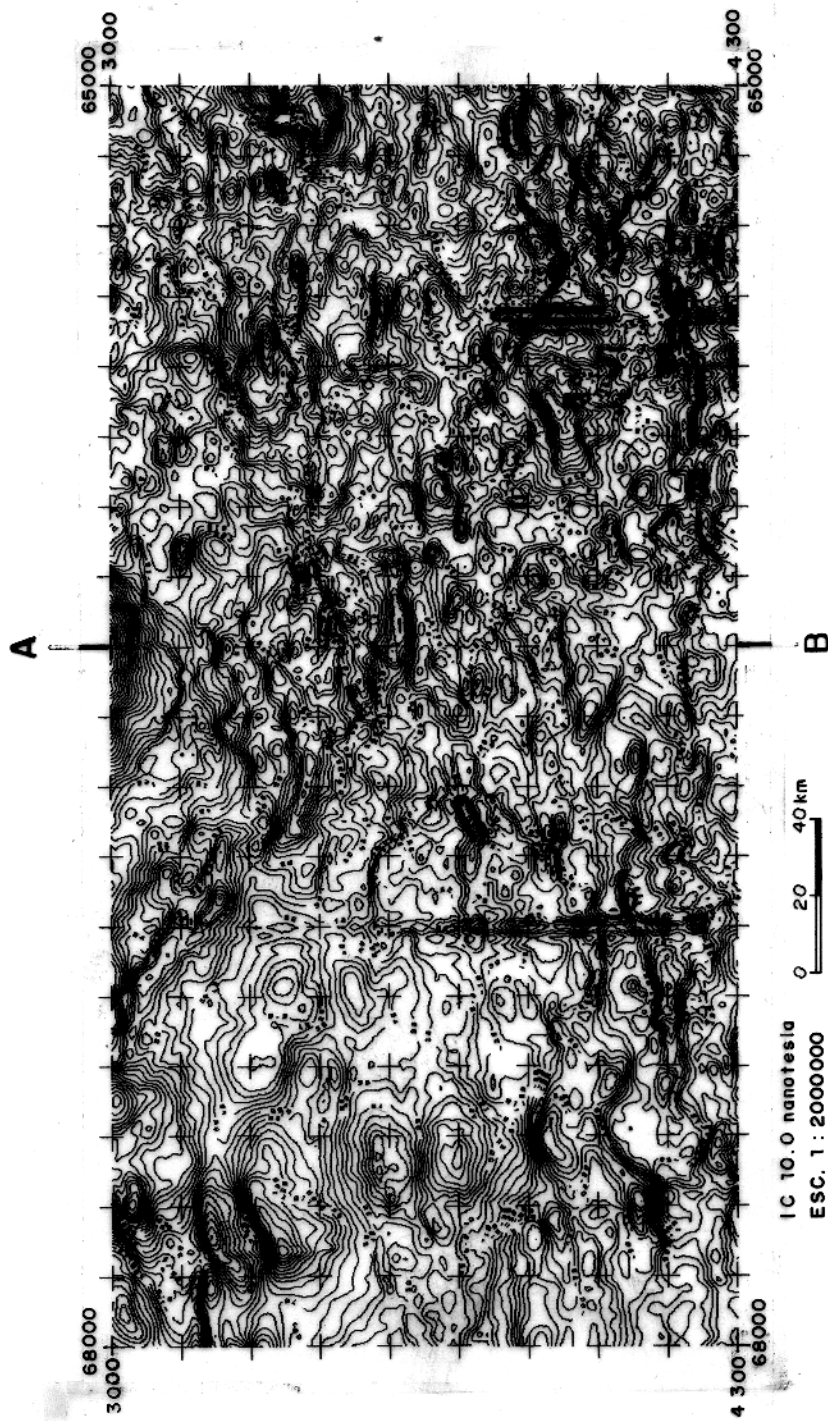


Figura 7 - Mapa de contorno do campo magnético anômalo referente ao projeto Caraquari-Norte. A-B significa as posições iniciais e finais de um perfil magnético orientado na direção N/S, (fig.10).



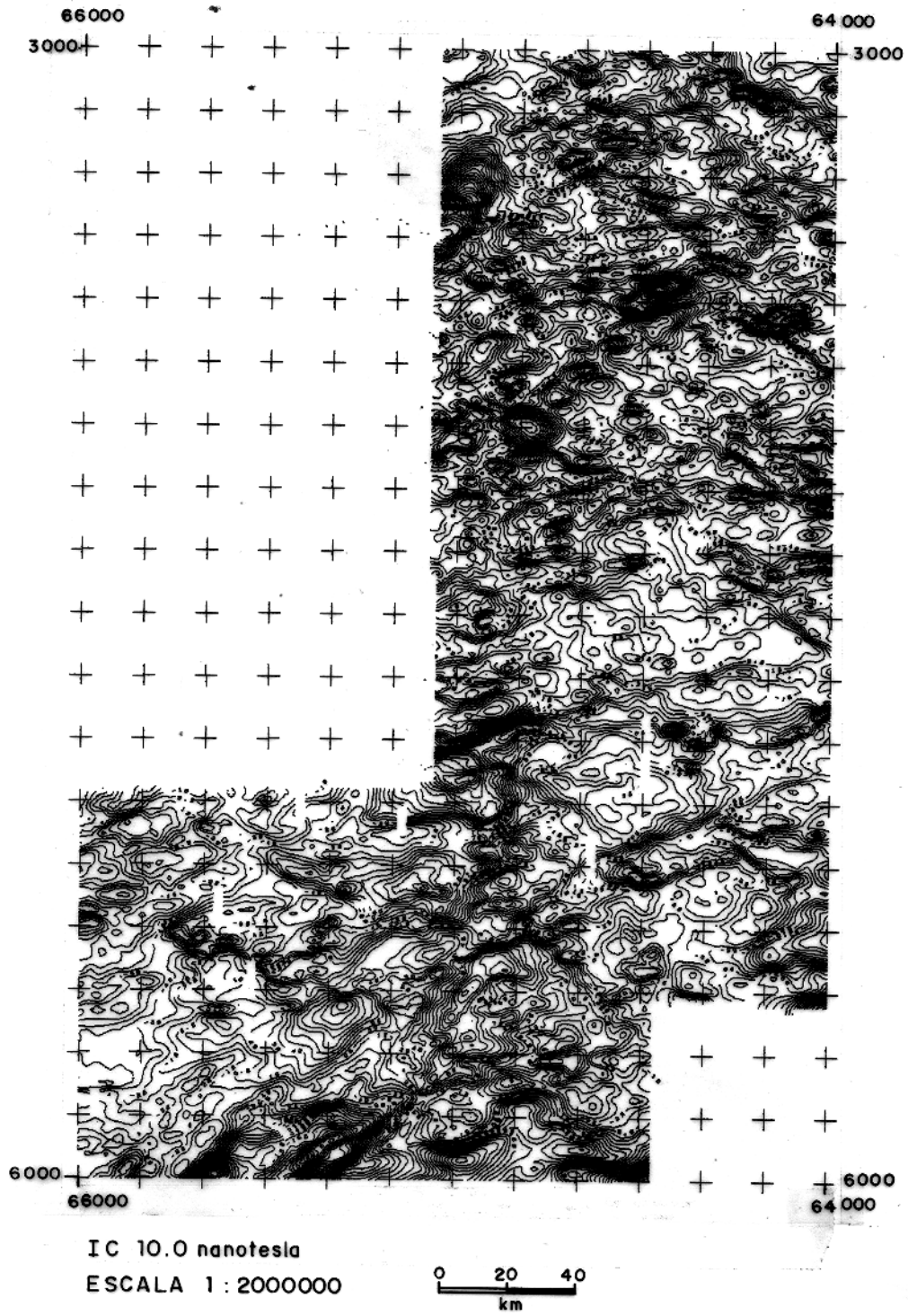


Figura 8 – Mapa de contorno do campo magnético anômalo referente ao projeto Coari Oeste.

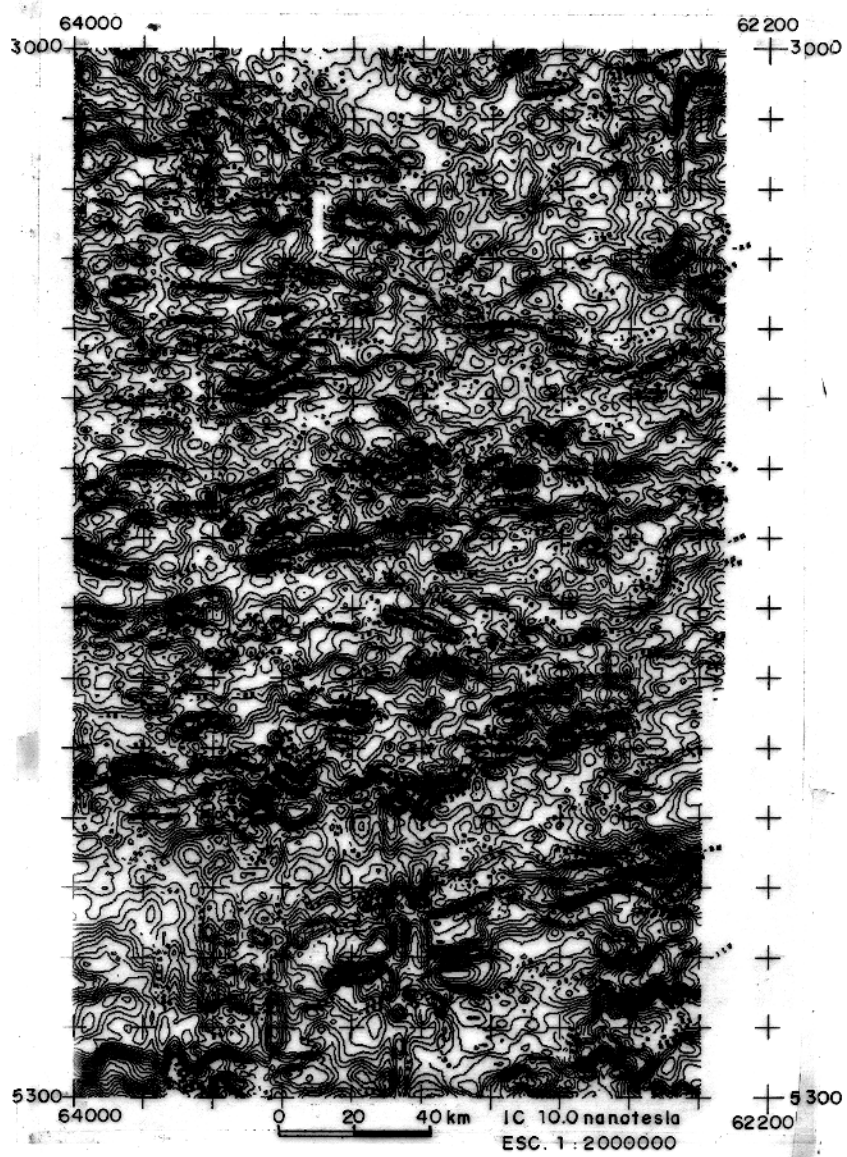


Figura 9 – Mapa de contorno do campo magnético anômalo referente ao projeto Coari Leste.

PERFIL OBSERVADO A-B

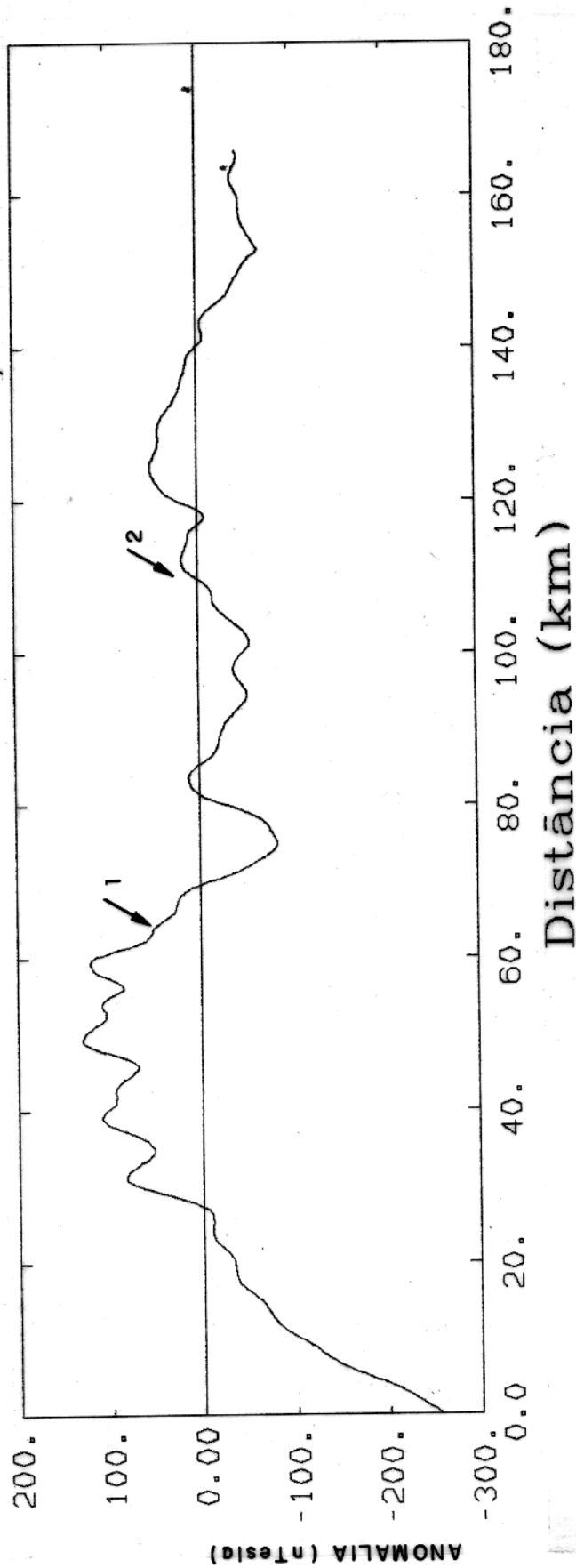


Figura 10— Perfil magnético A-B, orientado na direção N/S, e localizado no projeto Carauari— Norte (fig. 7), mostrando regiões caracterizadas por uma predominância de fontes de alta— frequência associadas a altos magnéticos regionais (seta 1), em contraste com regiões onde estas fontes de alta frequência estão relativamente ausentes e associadas a baixos magné— ticos regionais (seta 2).



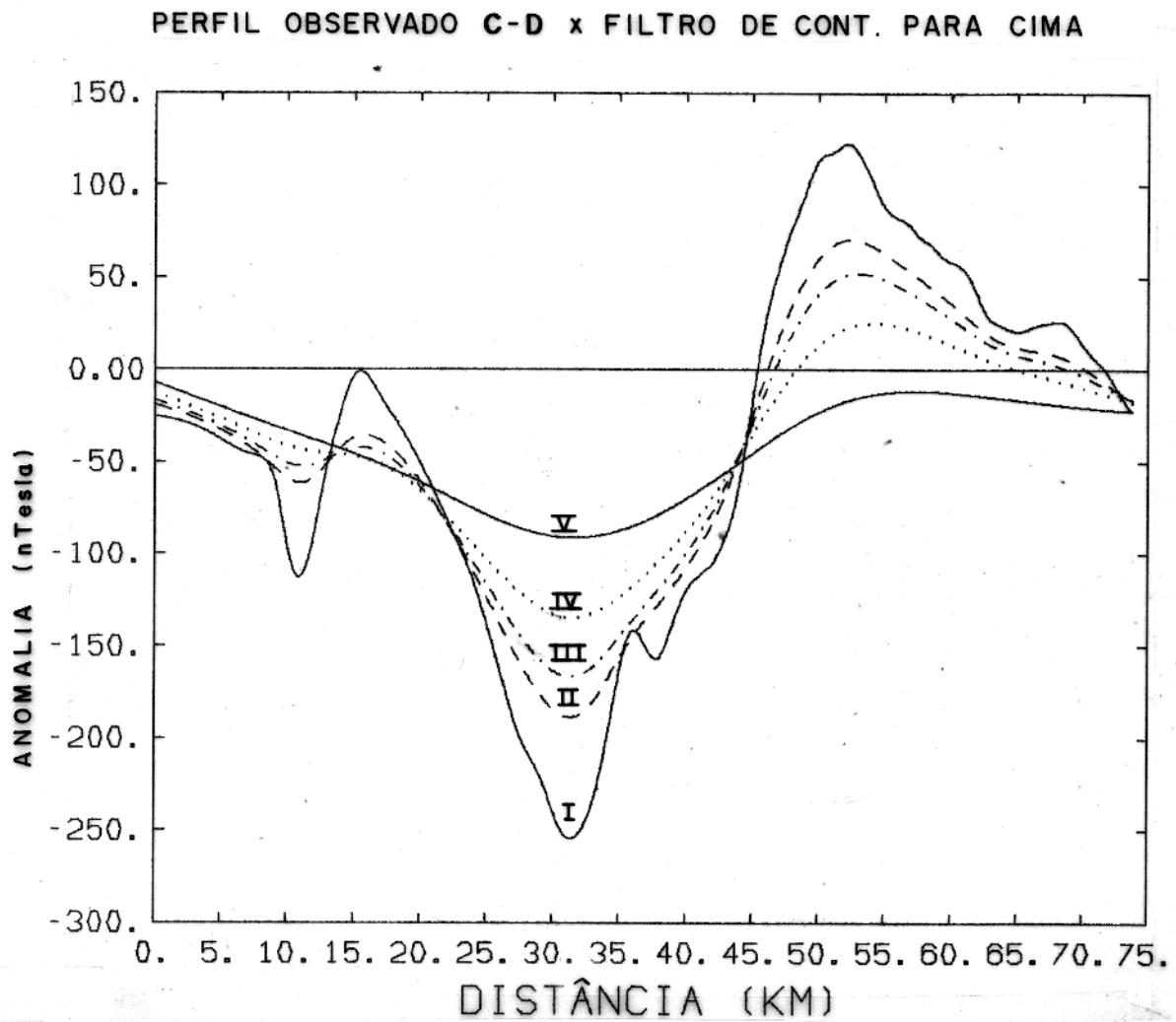


Figura 11 – Perfil N-S (figura 6) do campo magnético observado (I) versus campos magnéticos calculados a partir de filtragens de continuação para cima. As curvas II, III, IV, e V, representam respectivamente as continuações para altitudes 2, 3, 5, e 10 km.

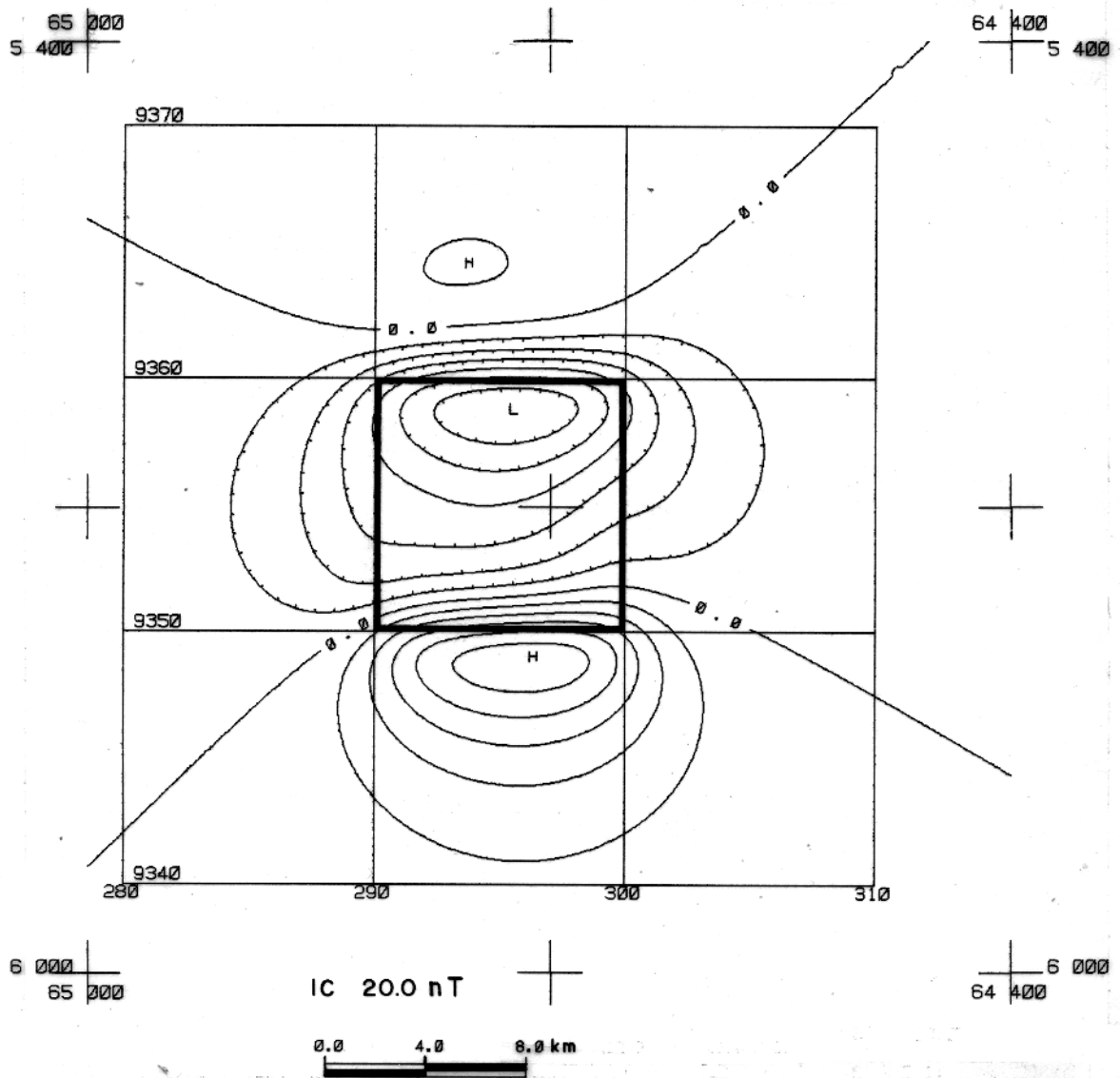


Figura 12 – Campo magnético sintético de um prisma em baixas latitudes. A intensidade do campo magnético local utilizada foi 28000 nT, com  $17^\circ$  de inclinação e  $-7^\circ$  de declinação. Os valores da espessura, extensão lateral e profundidade do topo do prisma são respectivamente 1, 10 e 2 km. Foi considerado uma susceptibilidade magnética igual a 0.005 ucs para o cálculo desta anomalia.

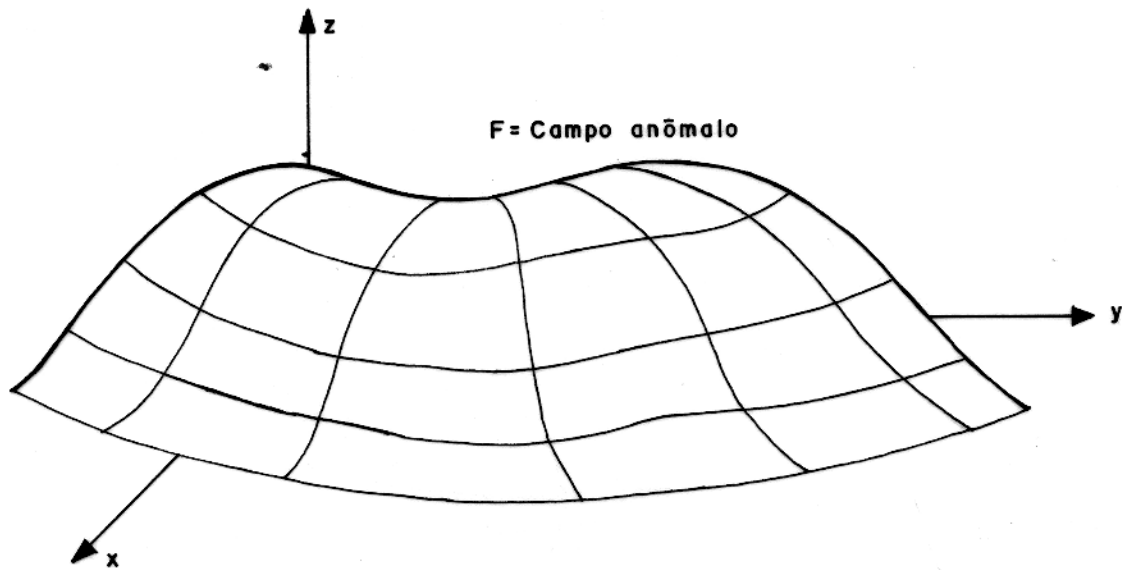


Figura 13 – Campo potencial  $F(x, y)$  representado por uma componente vertical de um sistema de coordenadas cartesianas.

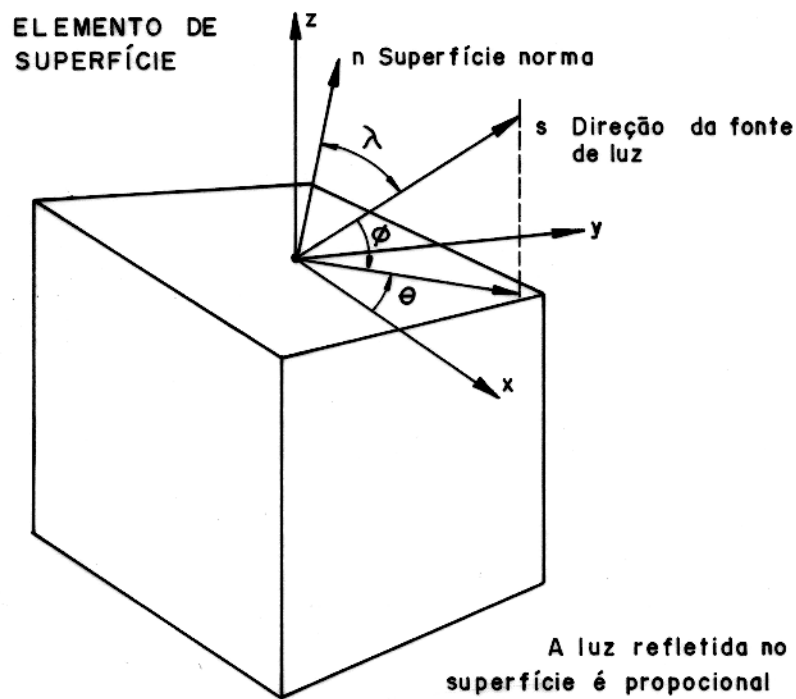


Figura 14 – Elemento superficial do campo potencial  $F(x, y)$  mostrando a geometria e nomenclatura associada ao método de imagens digitais de sombreamento.

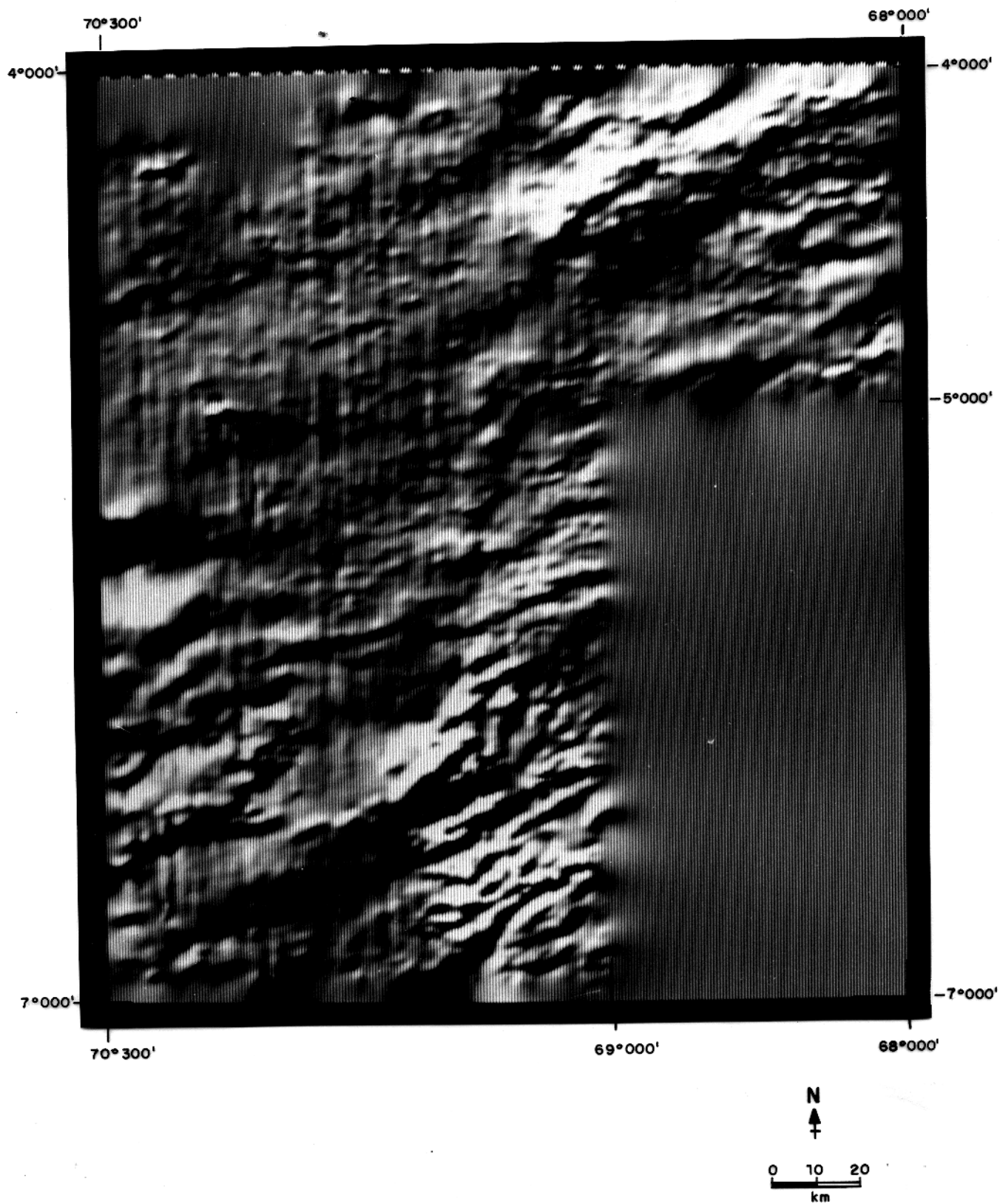


Figura 15 – Imagem digital de relevo sombreado do Projeto Jutai gerada a partir de iluminação artificial orientada na direção N50°W, 45° de elevação e 7 % de saturação.

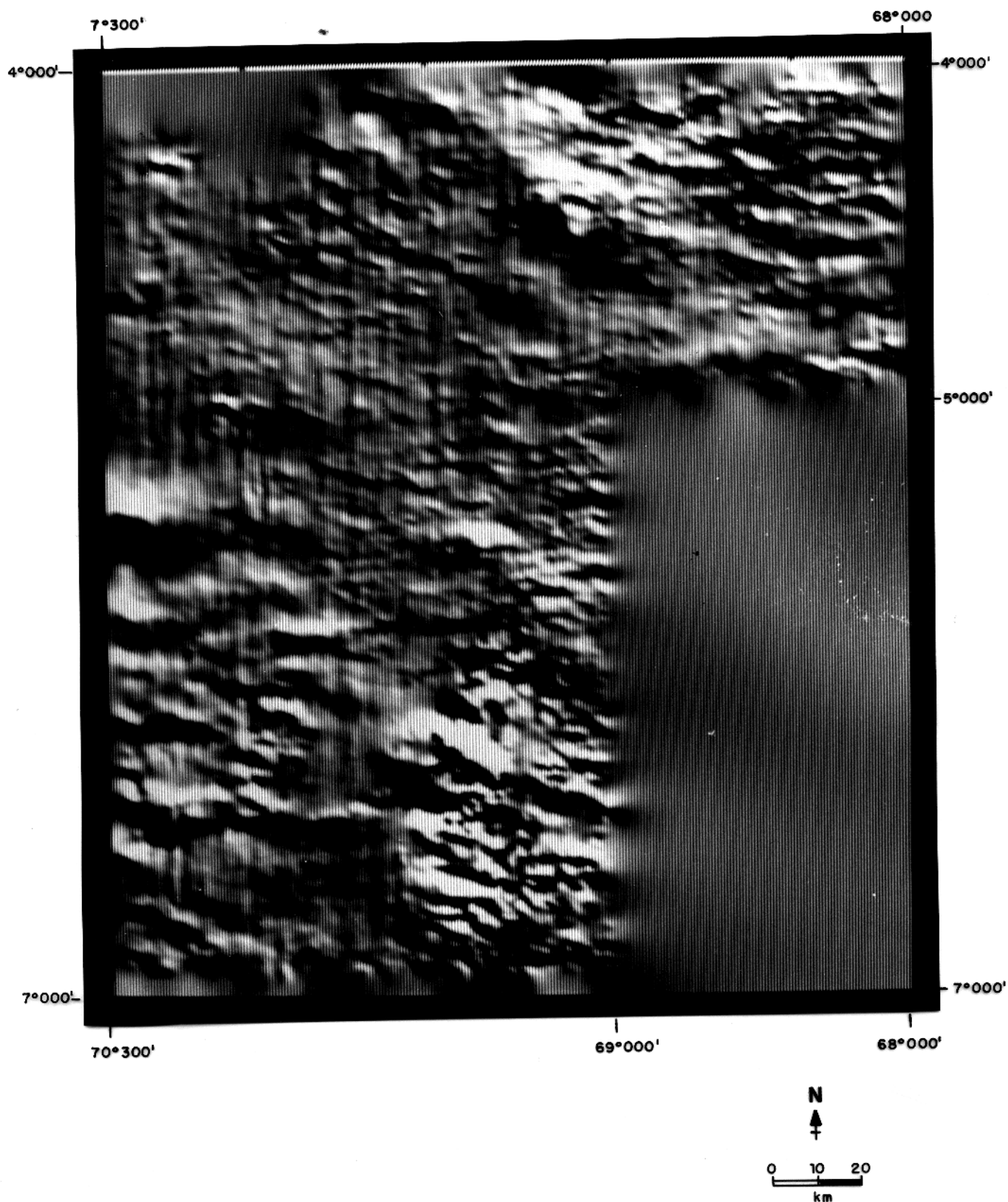
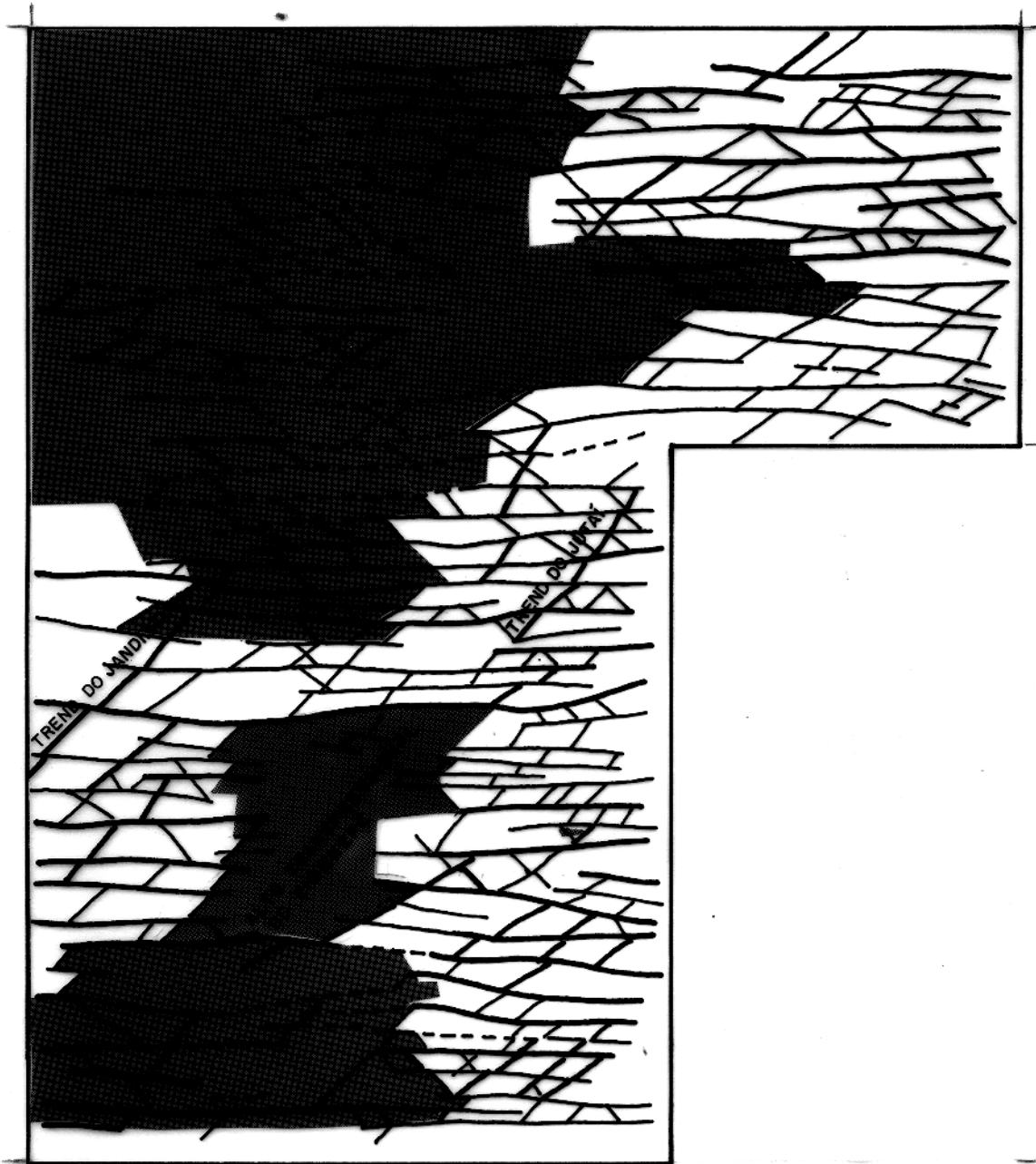






Figura 16 – Imagem digital de relevo sombreado do Projeto Jutai gerada a partir de iluminação artificial orientada na direção N45°E, 45° de elevação e 8 % de saturação.



**LEGENDA**

-  Lineamentos magnéticos fortemente definidos
-  Lineamentos magnéticos bem definidos
-  Lineamentos magnéticos inferidos
-  Principais regiões caracterizadas pela ausência relativa de fontes de alta frequência.

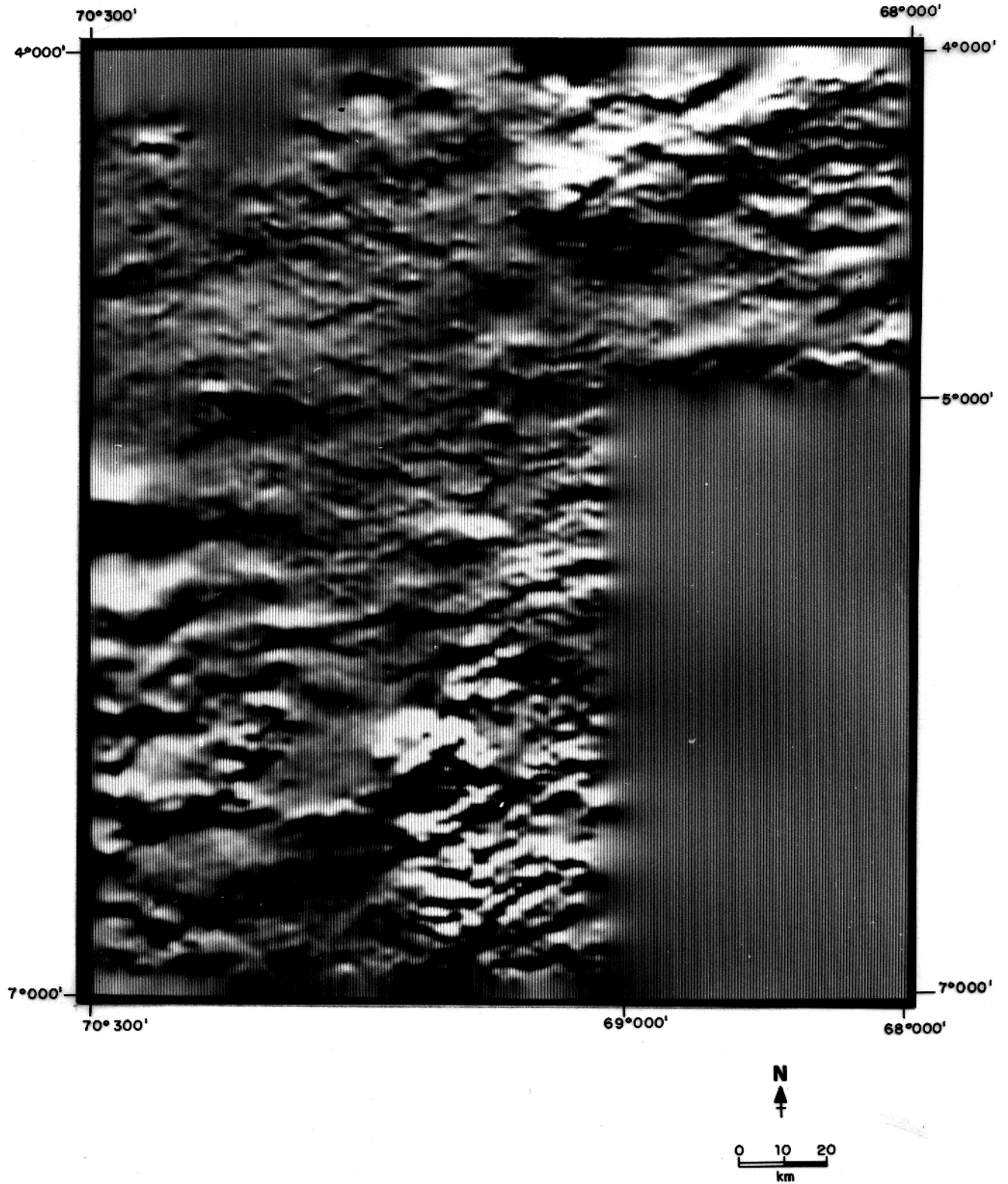


Figura 17 – Imagem digital de relevo sombreado do Projeto Jutai gerada a partir de iluminação artificial orientada na direção N/S, 45° de elevação e 8 % de saturação.



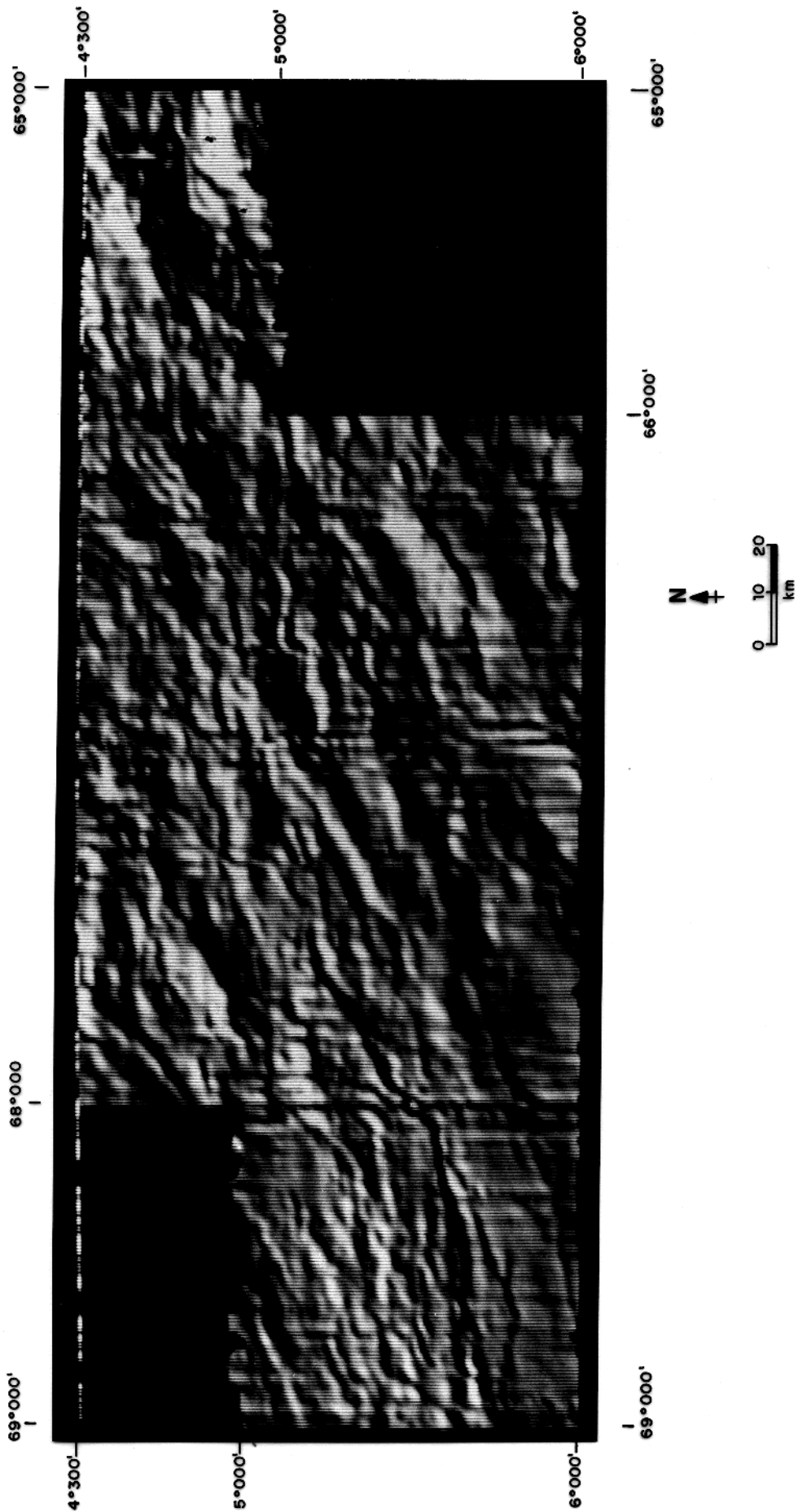


Figura 18 - Imagem digital de relevo sombreado do Projeto Carauari Sul gerada a partir de iluminação artificial orientada na direção N50°W, 45° de elevação e 9% de saturação.



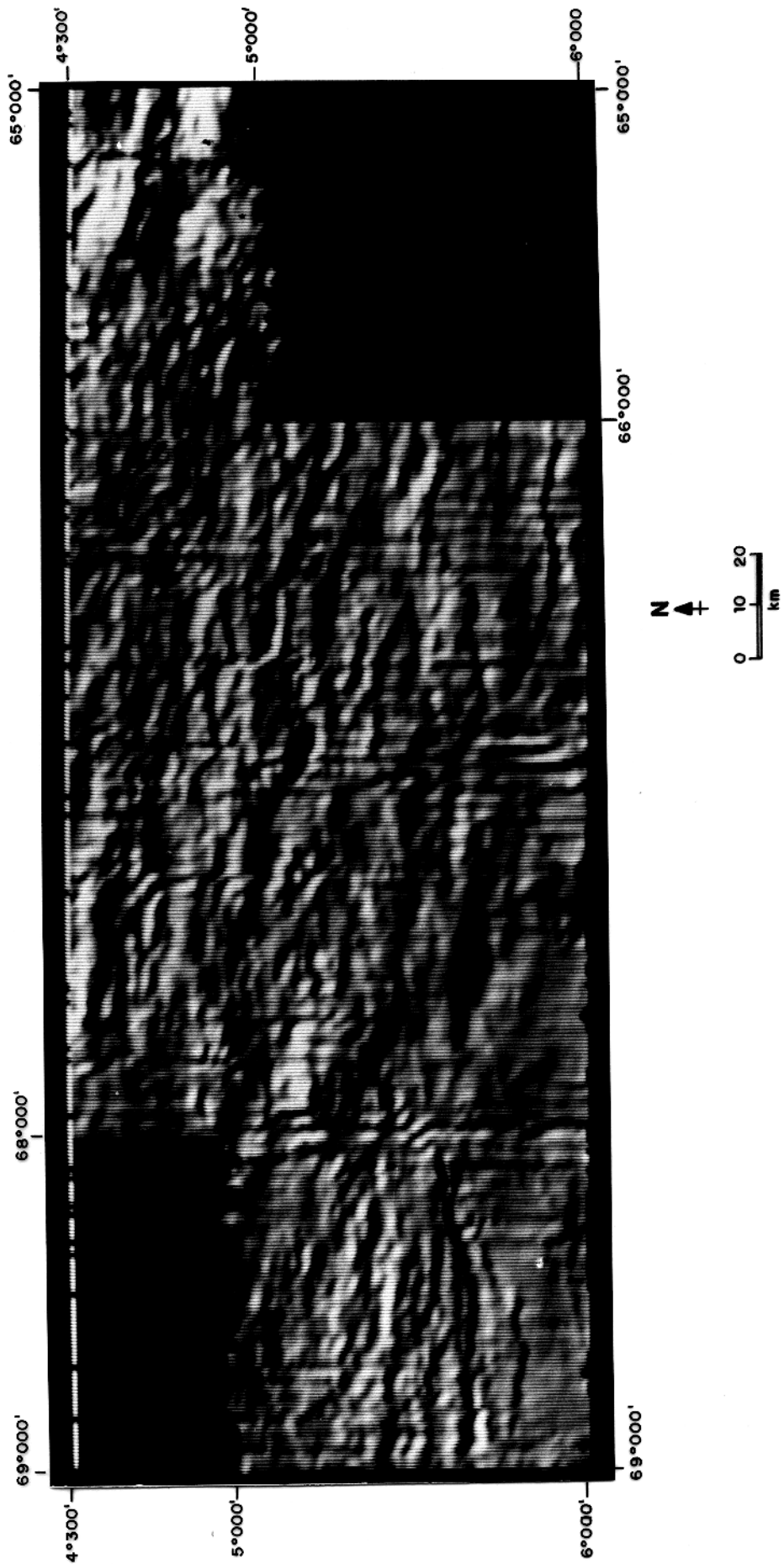





Figura 19 – Imagem digital de relevo sombreado do Projeto Caruaru Sul gerada a partir de iluminação artificial orientada na direção N45°E, 45° de elevação e 7 % de saturação.



LEGENDA

- 
 Lineamentos magnéticos fortemente definidos
- 
 Lineamentos magnéticos bem definidos
- 
 Principais regiões caracterizadas pela ausência relativa de fontes de alta frequência

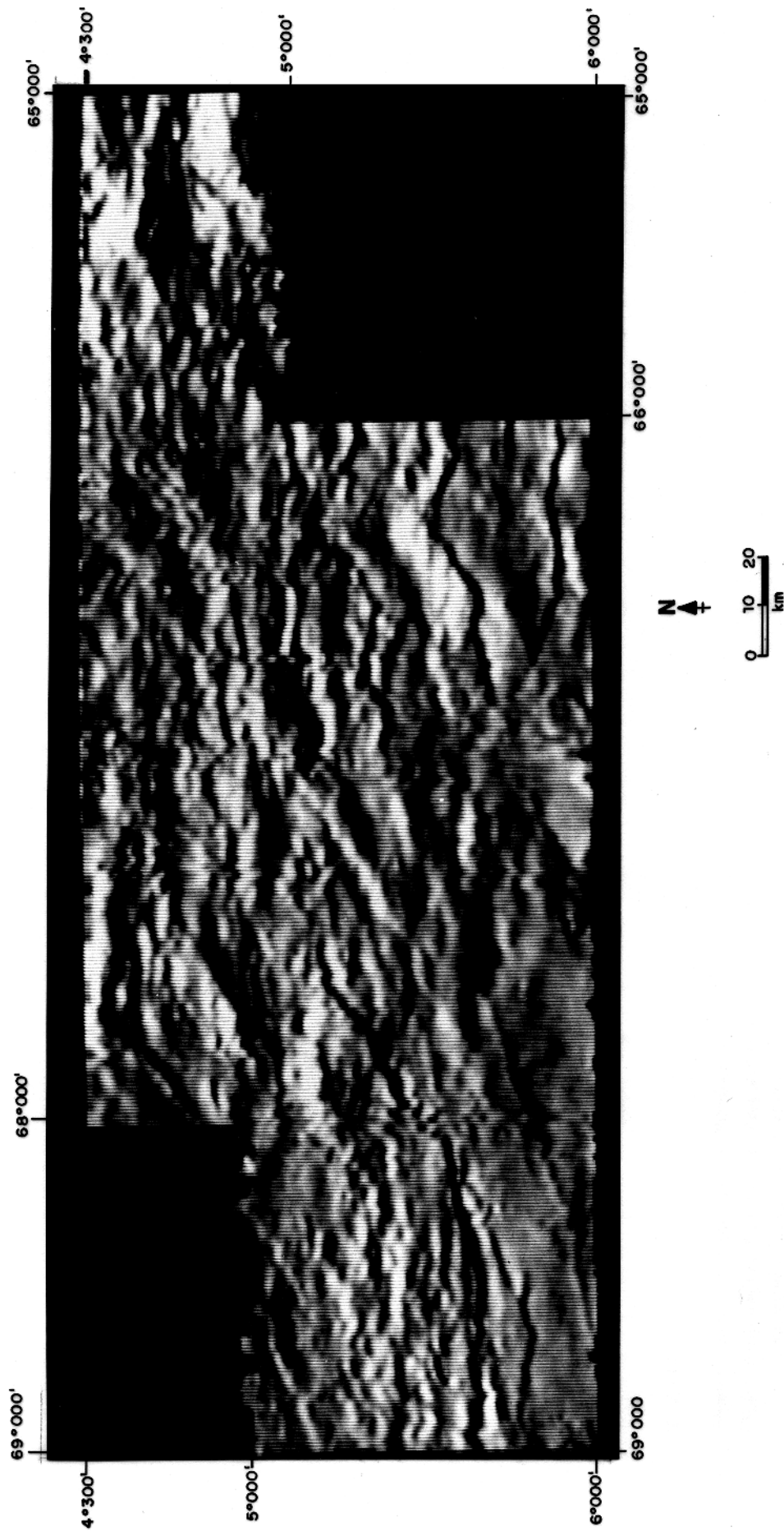


Figura 20 - Imagem digital de relevo sombreada do Projeto Carauari Sul gerada a partir de iluminação artificial orientada na direção N/S, 45° de elevação e 9% de saturação.

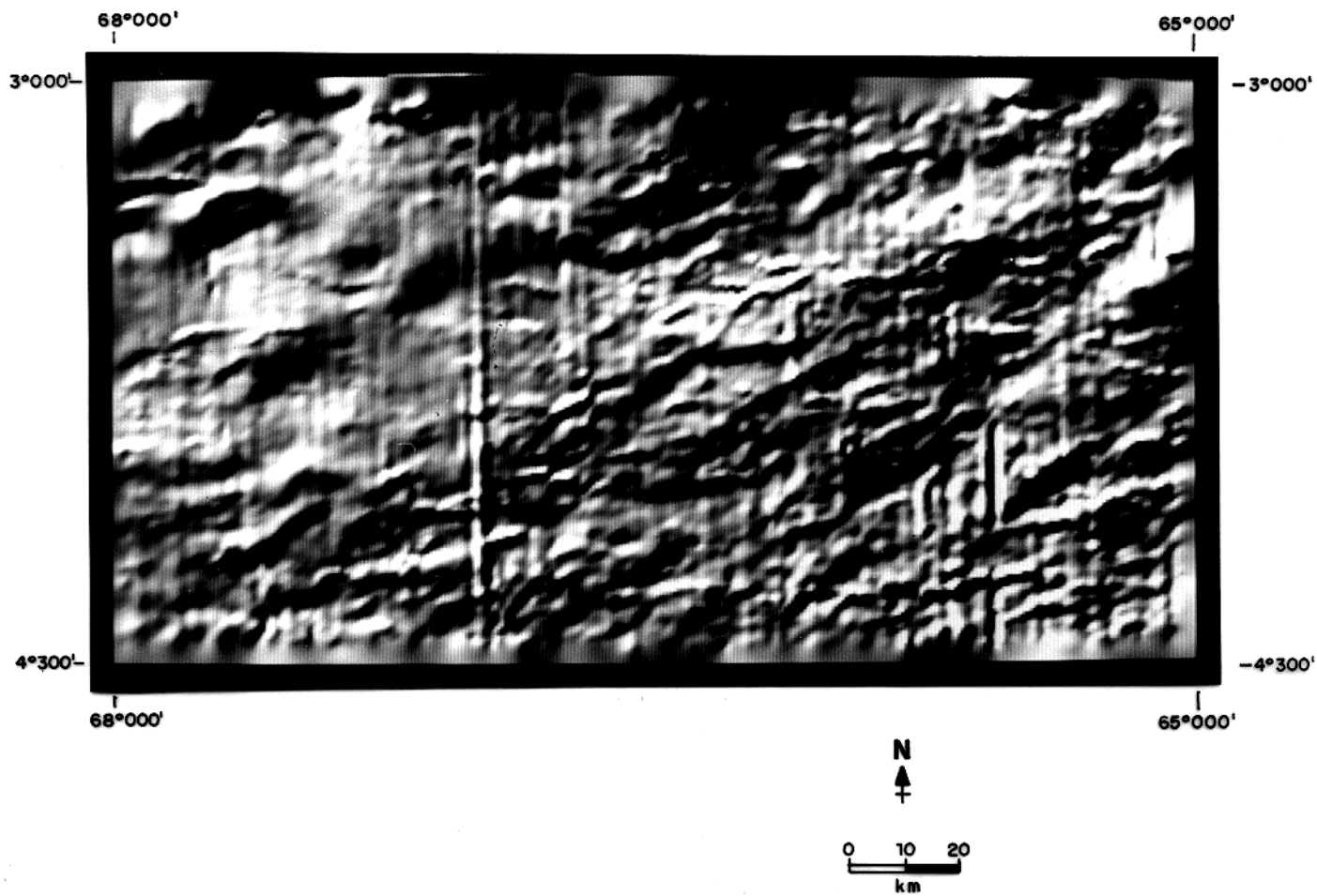


Figura 21 – Imagem digital de relevo sombreado do Projeto Carauari Norte gerada a partir de iluminação artificial orientada na direção N50°W, 45° de elevação e 9 % de saturação.

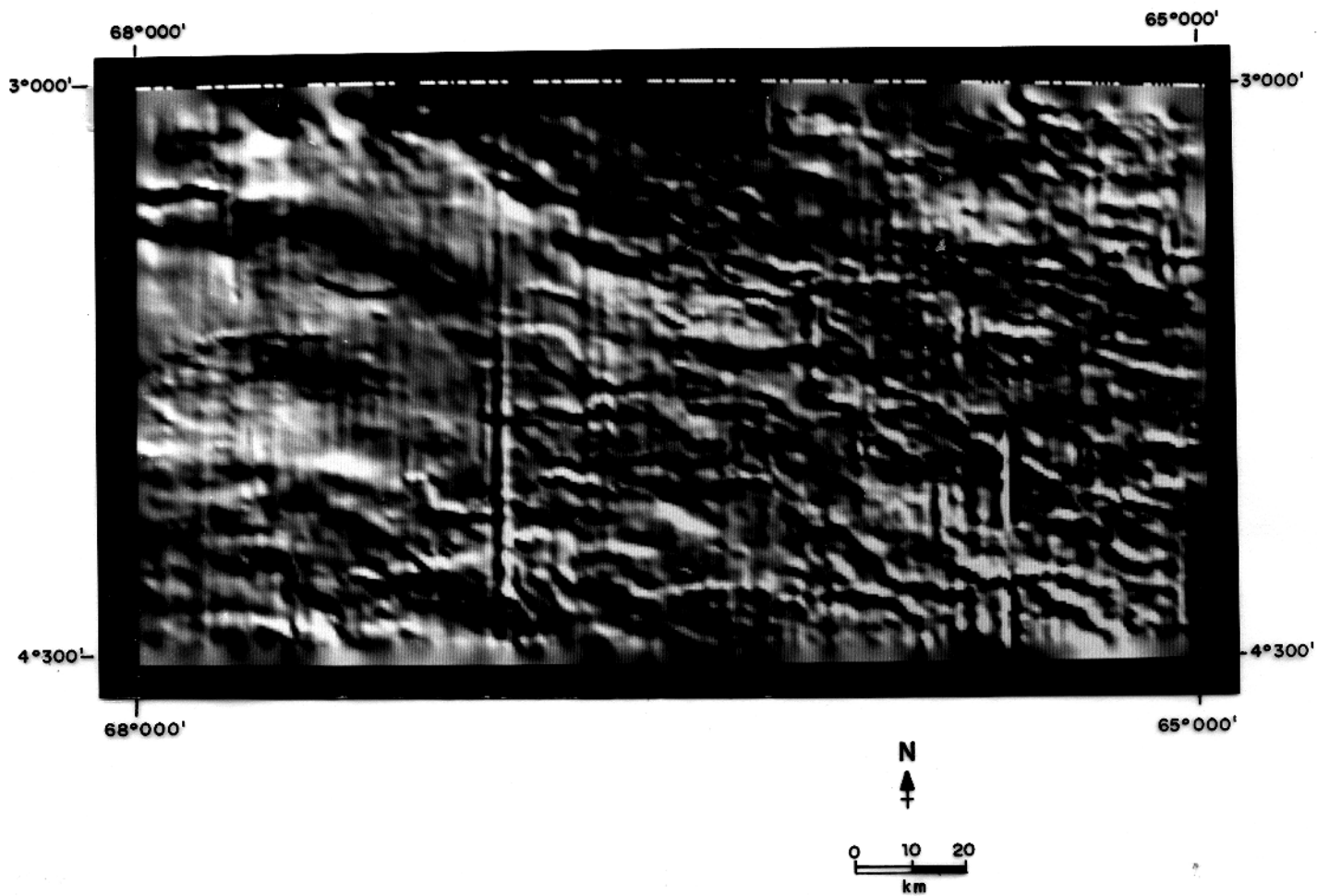
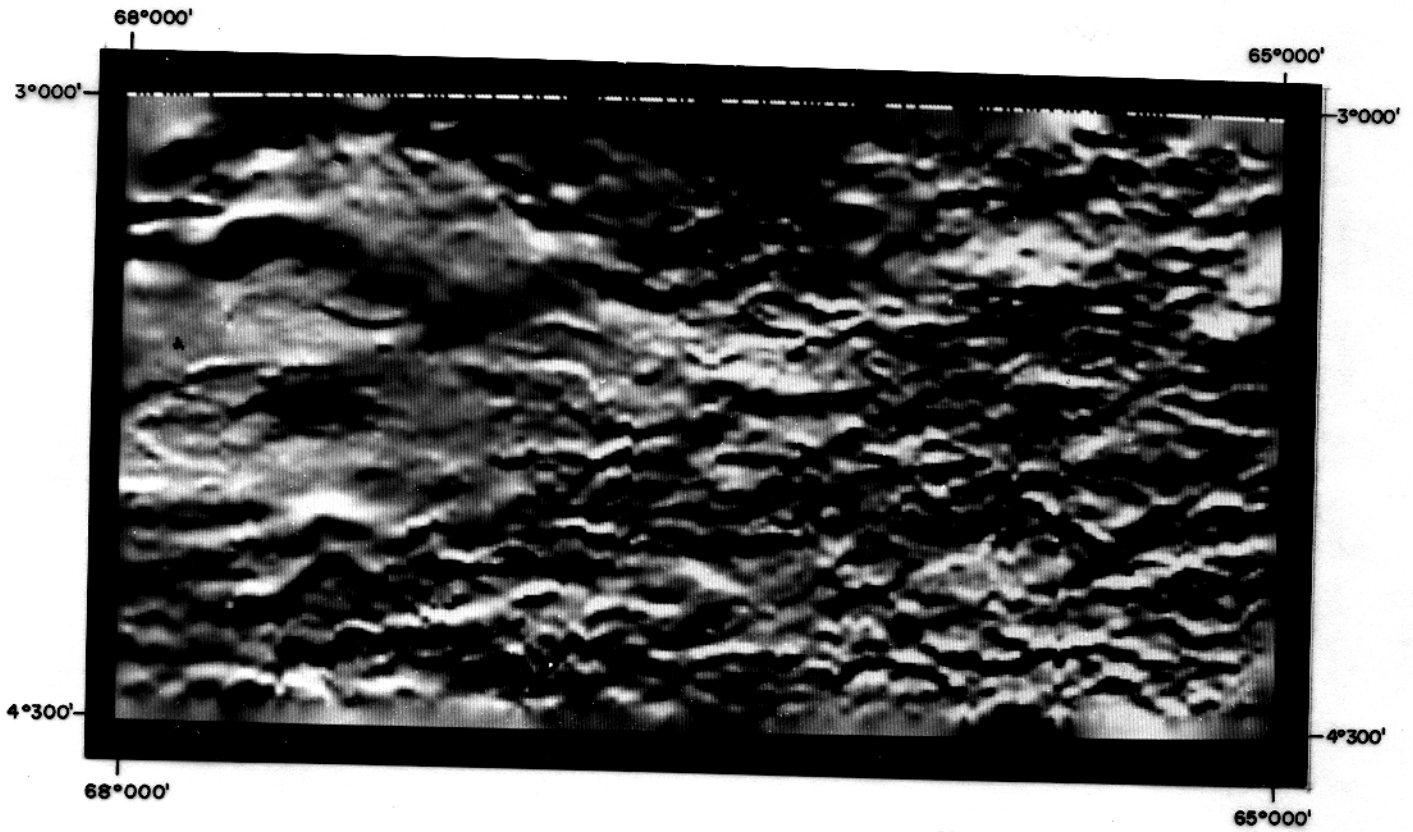
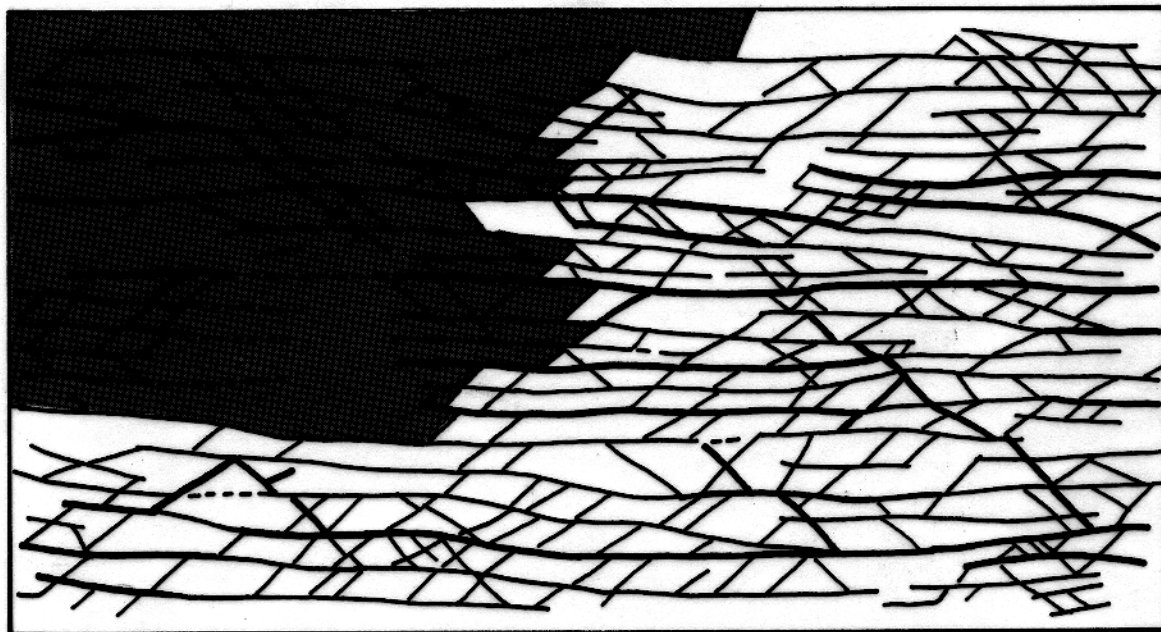


Figura 22 – Imagem digital de relevo sombreado do Projeto Carauari Norte gerada a partir de iluminação artificial orientada na direção  $N45^{\circ}E$ ,  $45^{\circ}$  de elevação e 8 % de saturação.



N  
↑



**LEGENDA**





-  Lineamentos magnéticos fortemente definidos
-  Lineamentos magnéticos bem definidos
-  Lineamentos magnéticos inferidos
-  Principais regiões caracterizadas pela ausência relativa de fontes de alta frequência.

Figura 23 – Imagem digital – Imagem digital de relevo sombreado do Projeto Carauari Norte gerada a partir de iluminação artificial orientada na direção N/S, 45° de elevação e 9 % de saturação.



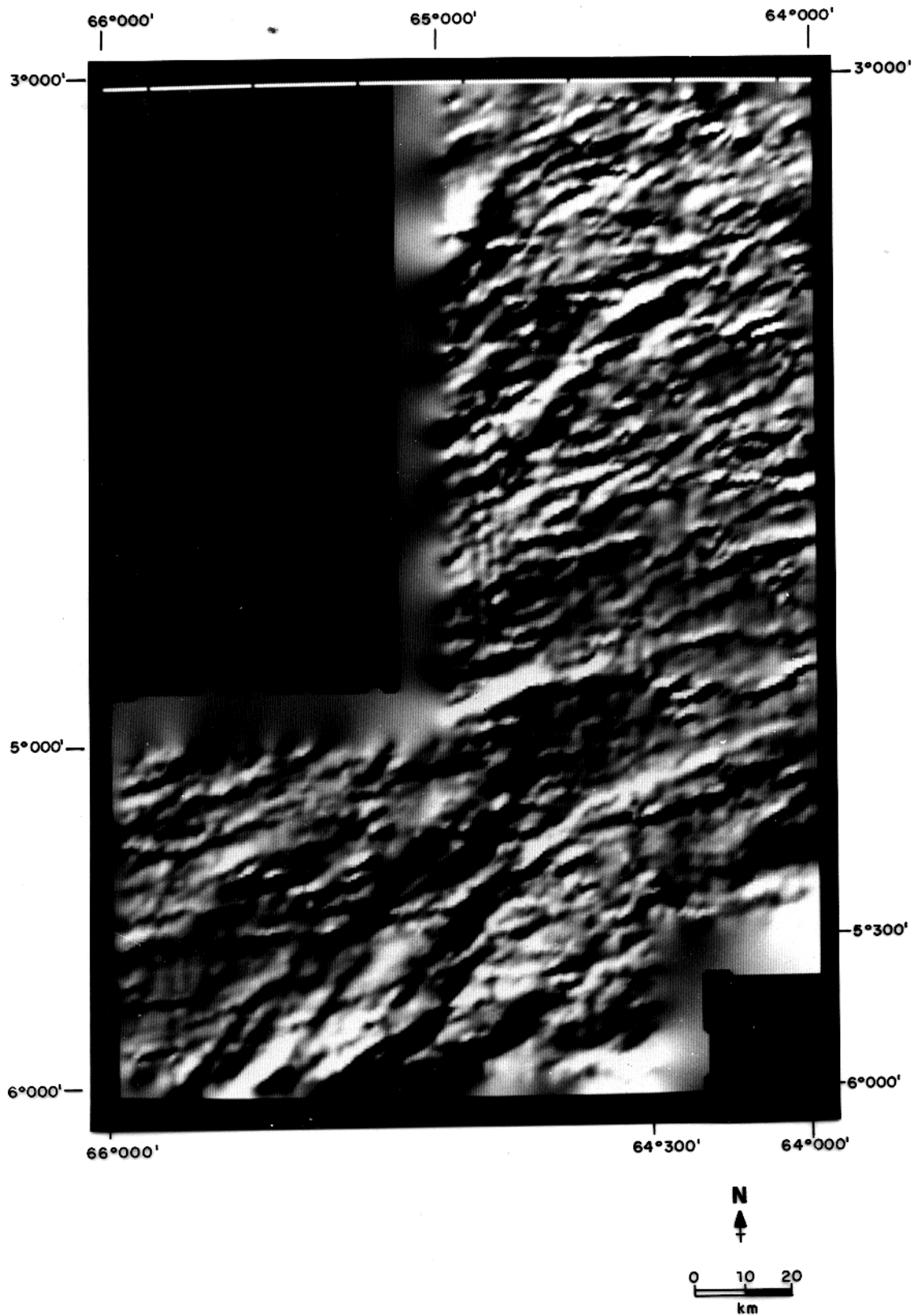


Figura 24 – Imagem digital de relevo sombreado do Projeto Coari Oeste gerada a partir de iluminação artificial orientada na direção  $N60^{\circ}W$ ,  $45^{\circ}$  de elevação e 10 % de saturação.



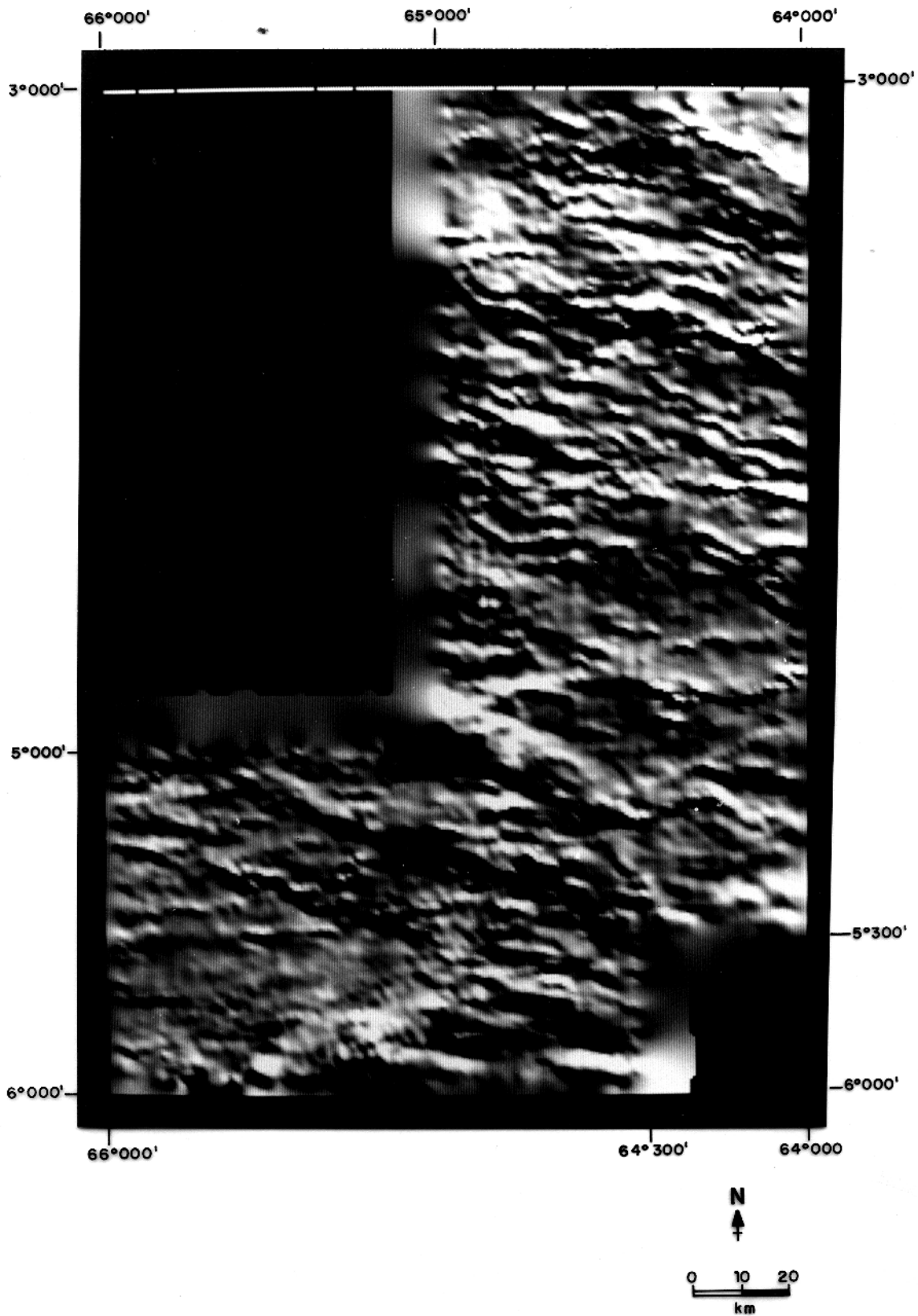
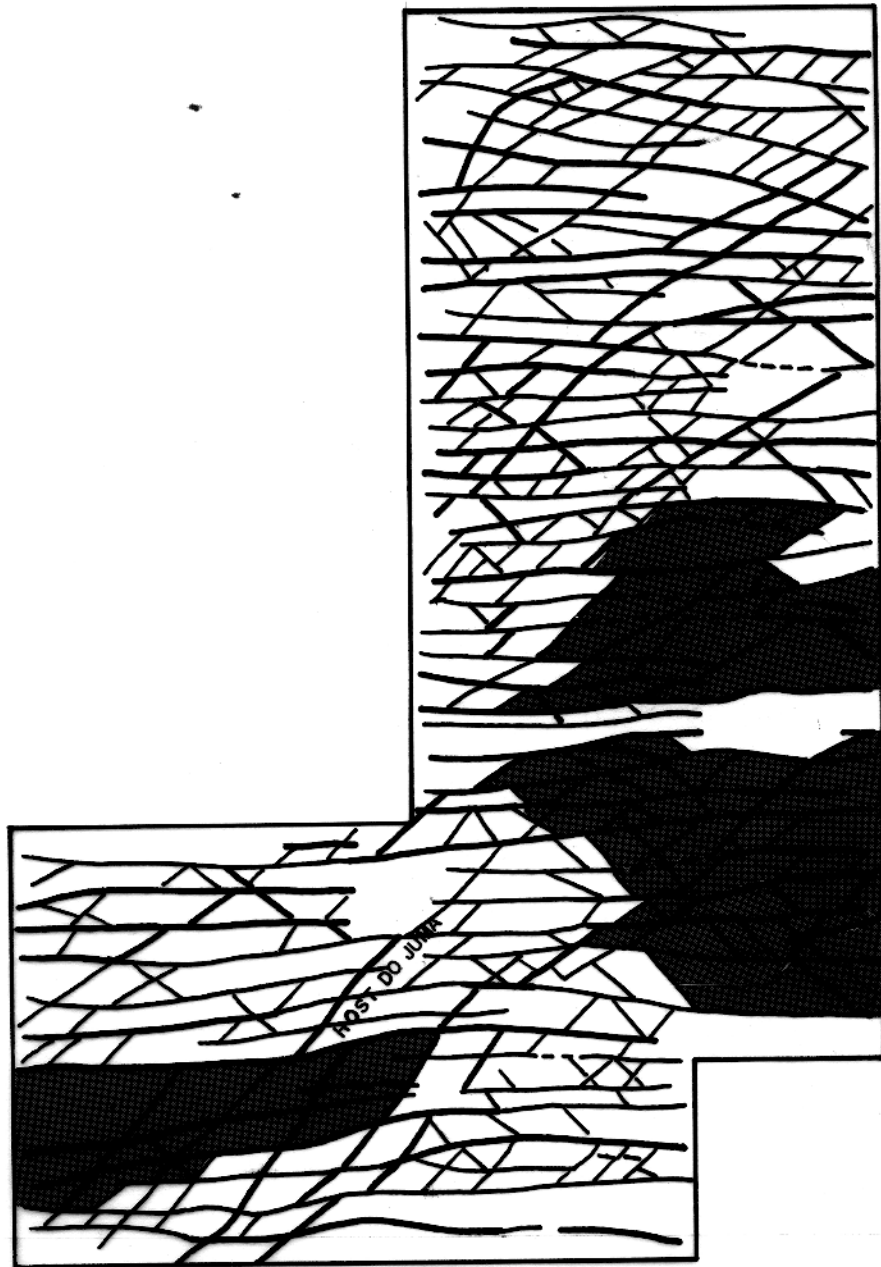






Figura 25 – Imagem digital de relevo sombreado do Projeto Coari Oeste gerada a partir de iluminação artificial orientada na direção N45°E, 45° de elevação e 9 % de saturação.



**LEGENDA**

-  Lineamentos magnéticos fortemente definidos
-  Lineamentos magnéticos bem definidos
-  Lineamentos magnéticos inferidos
-  Principais regiões caracterizadas pela ausência relativa de fontes de alta frequência.

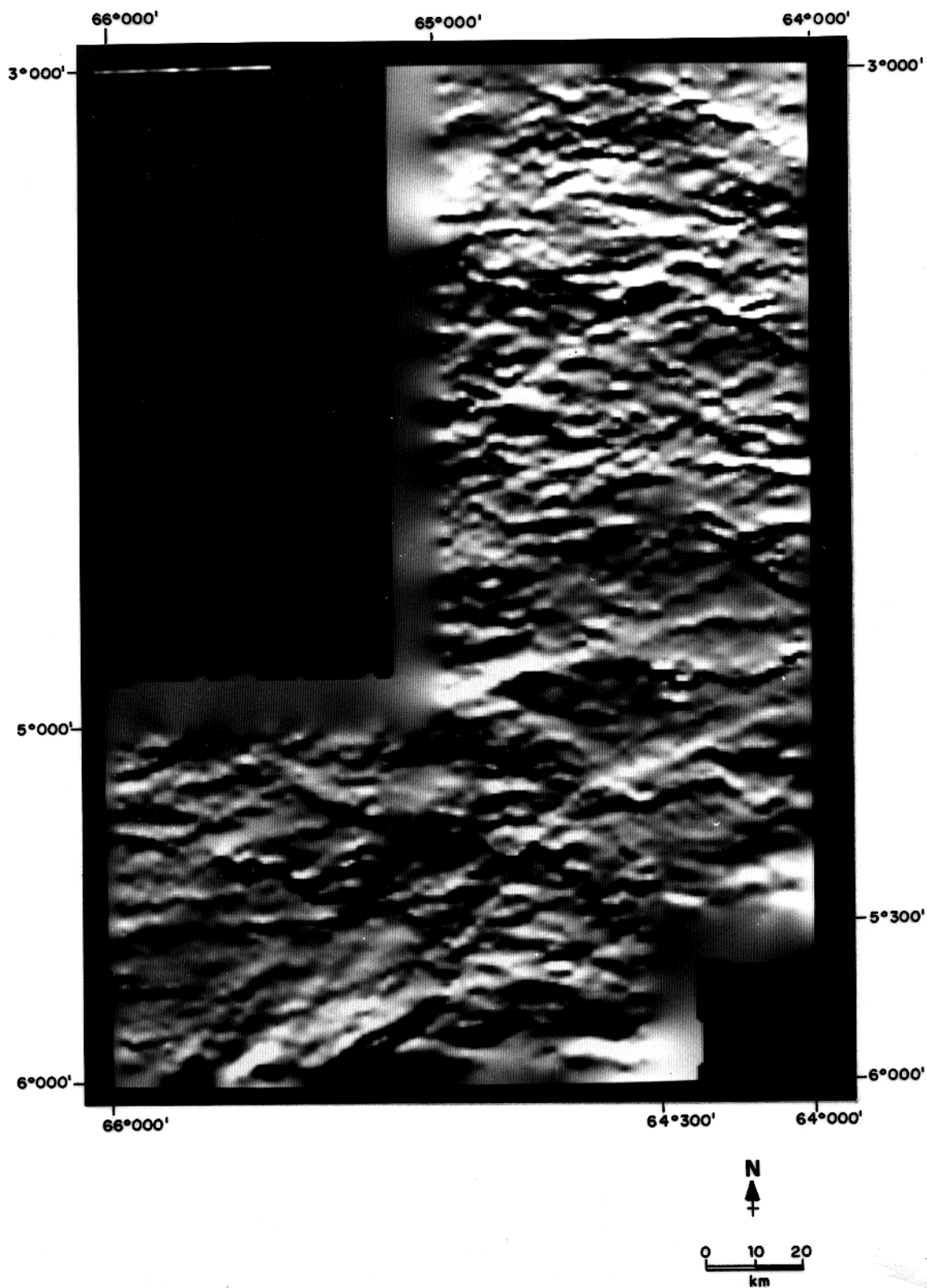


Figura 26 – Imagem digital de relevo sombreado do Projeto Coari Oeste gerada a partir de iluminação artificial orientada na direção N/S, 45° de elevação e 7% de saturação.

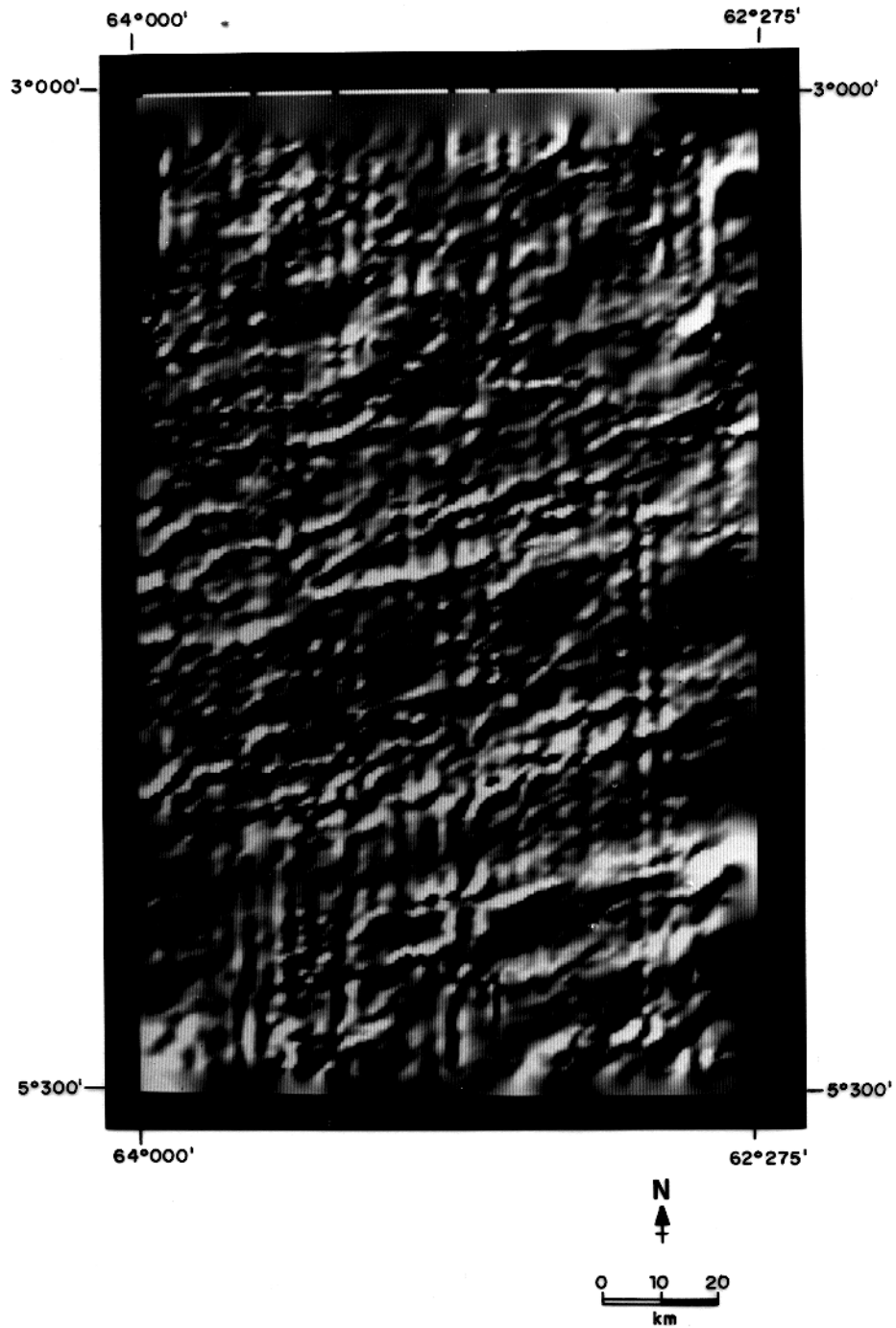


Figura 27 – Imagem digital de relevo sombreado do Projeto Coari Leste gerada a partir de iluminação artificial orientada na direção N60°W, 45° de elevação e 10 % de saturação.

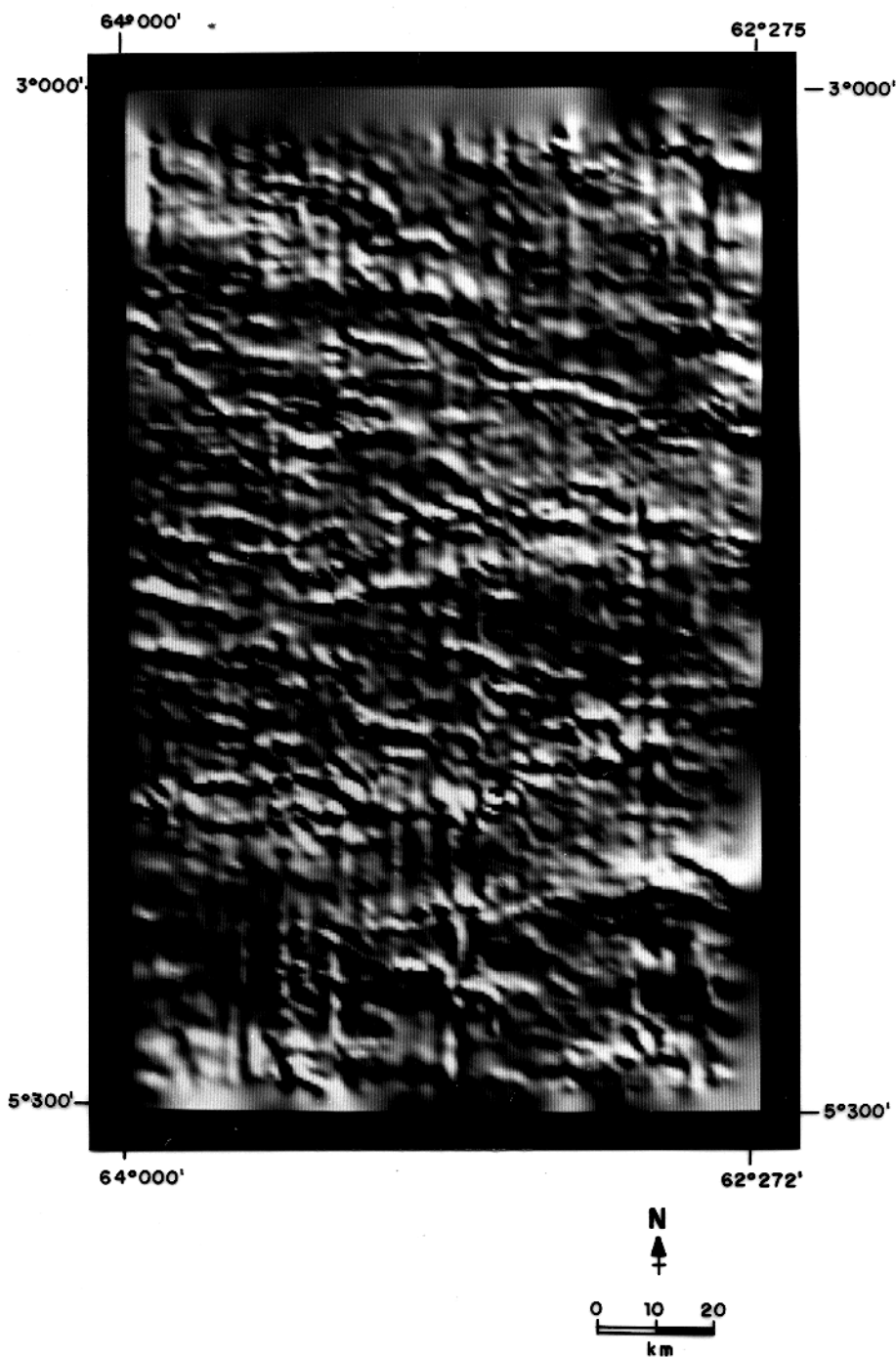
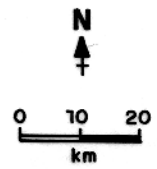
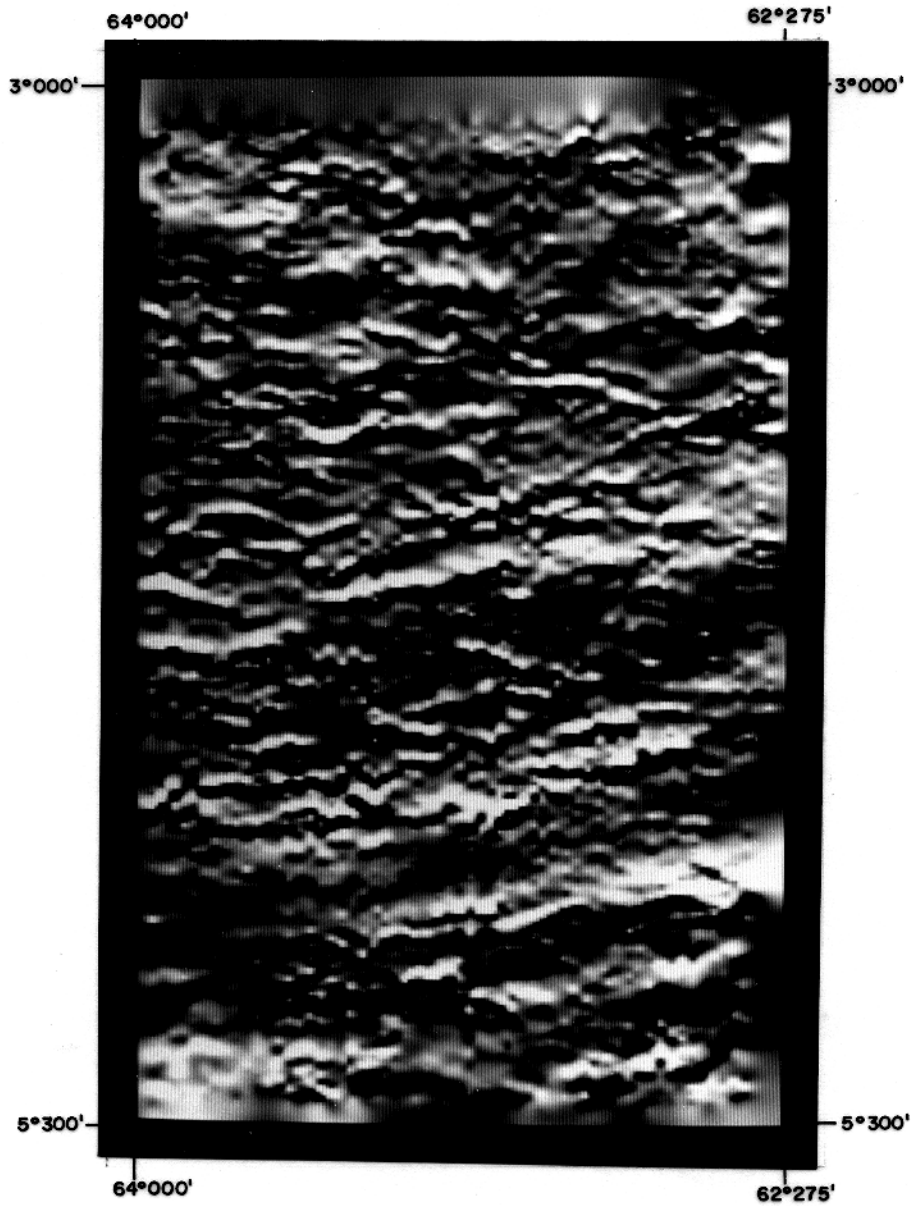


Figura 28 – Imagem digital de relevo sombreado do Projeto Coari Leste gerada a partir de iluminação artificial orientada na direção N45°E, 45° de elevação e 6 % de saturação.





**LEGENDA**





-  Lineamentos magnéticos fortemente definidos
-  Lineamentos magnéticos bem definidos
-  Lineamentos magnéticos inferidos
-  Principais regiões caracterizadas pela ausência relativa de fontes de alta frequência.

Figura 29 – Imagem digital de relevo sombreado do Projeto Coari Leste gerada a partir de iluminação artificial orientada na direção N/S, 45° de elevação e 9 % de saturação.

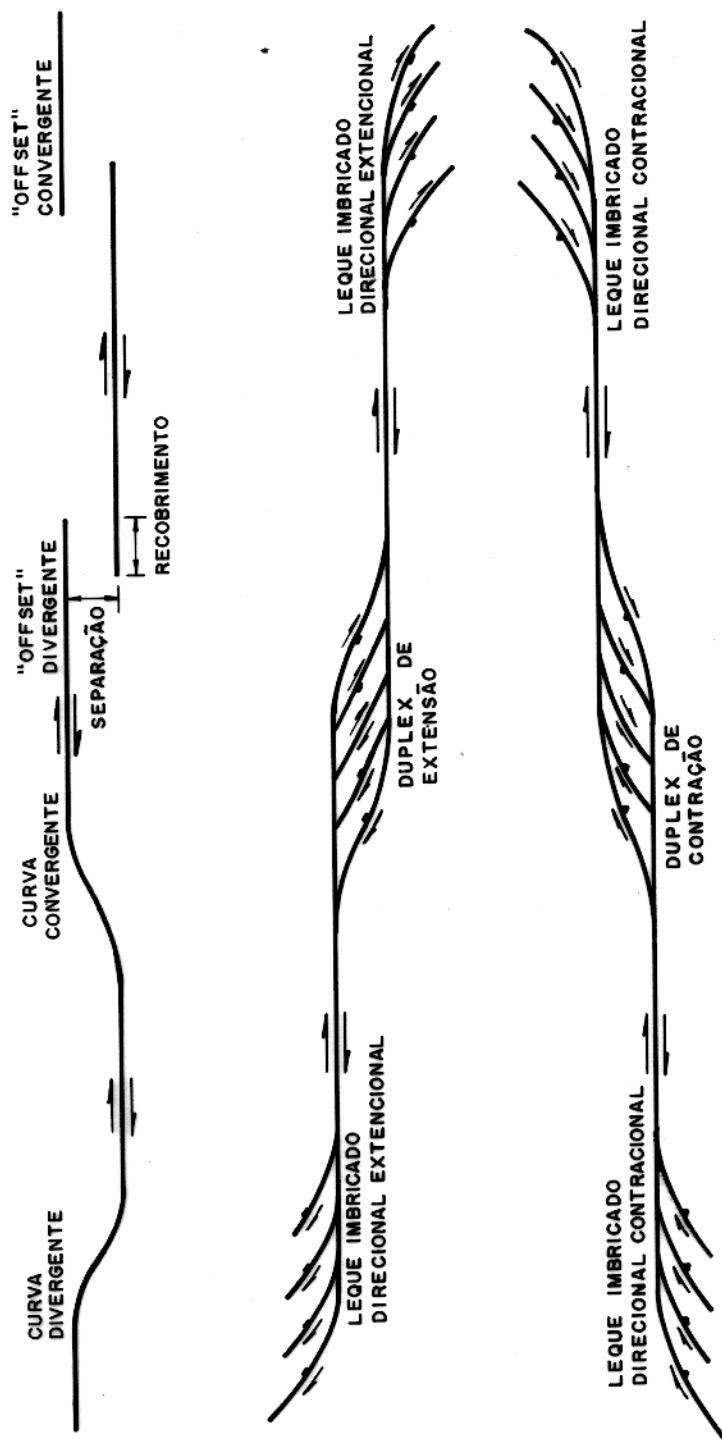


Figura 30- Feições estruturais associada a um sistema transcorrente dextral (Woodcock e Fischer, 1986).



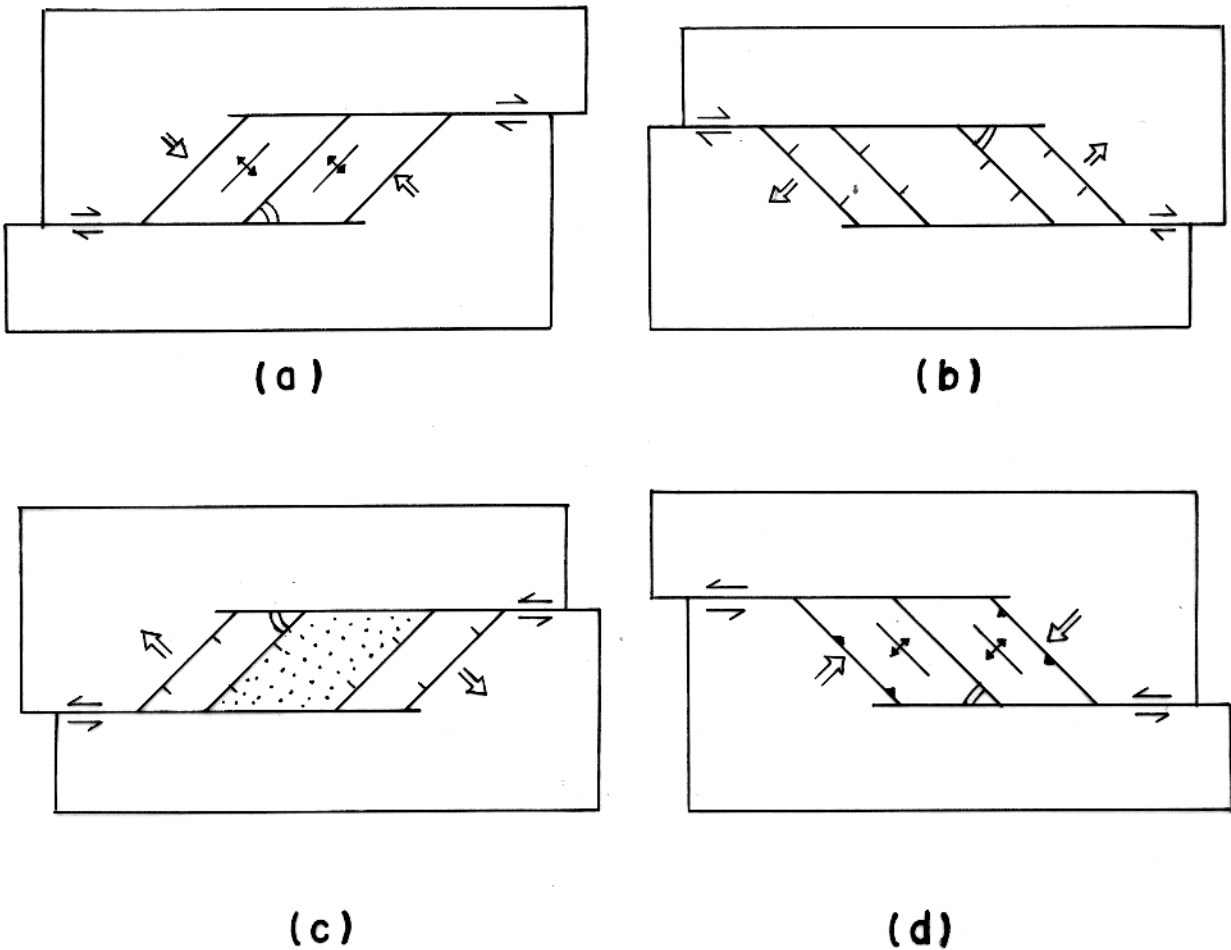


Figura 31 – Feições estruturais associadas ao recobrimento lateral entre zonas transcorrentes adjacentes. As figuras (a) e (b) mostram o recobrimento lateral pela esquerda formando respectivamente regimes de transpressão e transtensão. Em (c) e (d) a regra é inversa para o caso de um recobrimento lateral pela direita (modificado de Ransay e Huber, 1983)

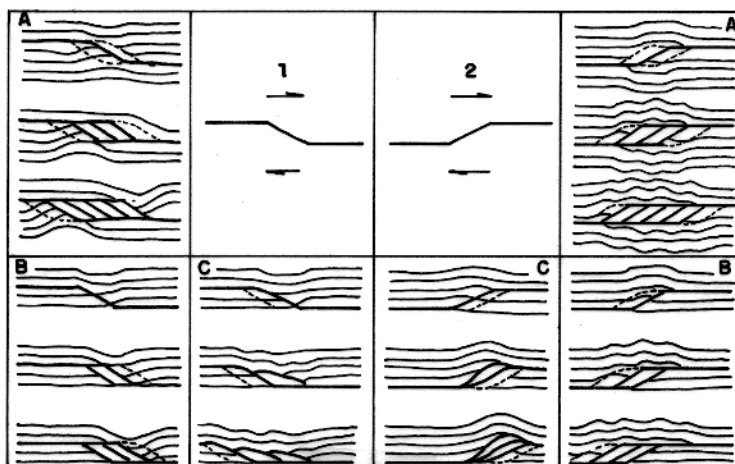


Figura 32 – Esquema de desenvolvimento de duplexes considerando zonas de cisalhamento dextrais. À esquerda arqueamento de extensão (1). À direita, arqueamento de contração. Desenvolvimento simétrico (a) e assimétrico com colapso da capa (b) ou colapso da lapa (c) (Woodcock e Fisher, 1986, modificado por Hasui e Costa, 1990)

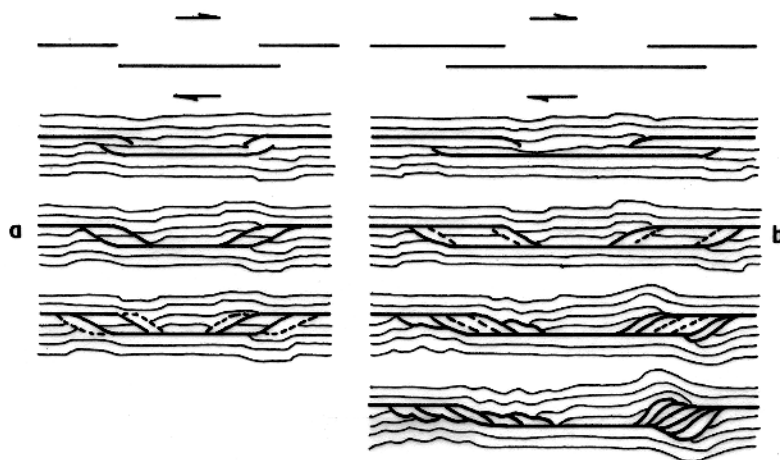


Figura 33 – Esquema de desenvolvimento de duplexes em zonas de recobrimento. À esquerda, pequeno recobrimento, levando a formação de arqueamento de extensão (à esquerda) e de contração (à direita) (Woodcock e Fisher, 1986, modificado por Hasui e Costa, 1990)

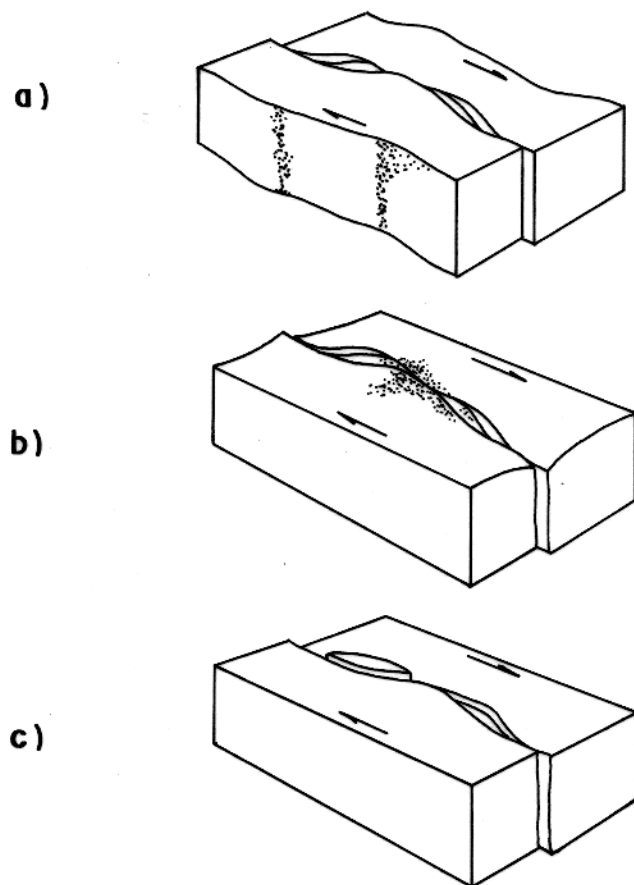


Figura 34 – Esquema de acomodação dos deslocamentos transcorrentes. Em (a), acomodação por distorção dos blocos. Em (b), acomodação por elevação topográfica, e em (c) por formação de estruturas de ejeção e bacias ( Woodcock e Fisher, 1986).

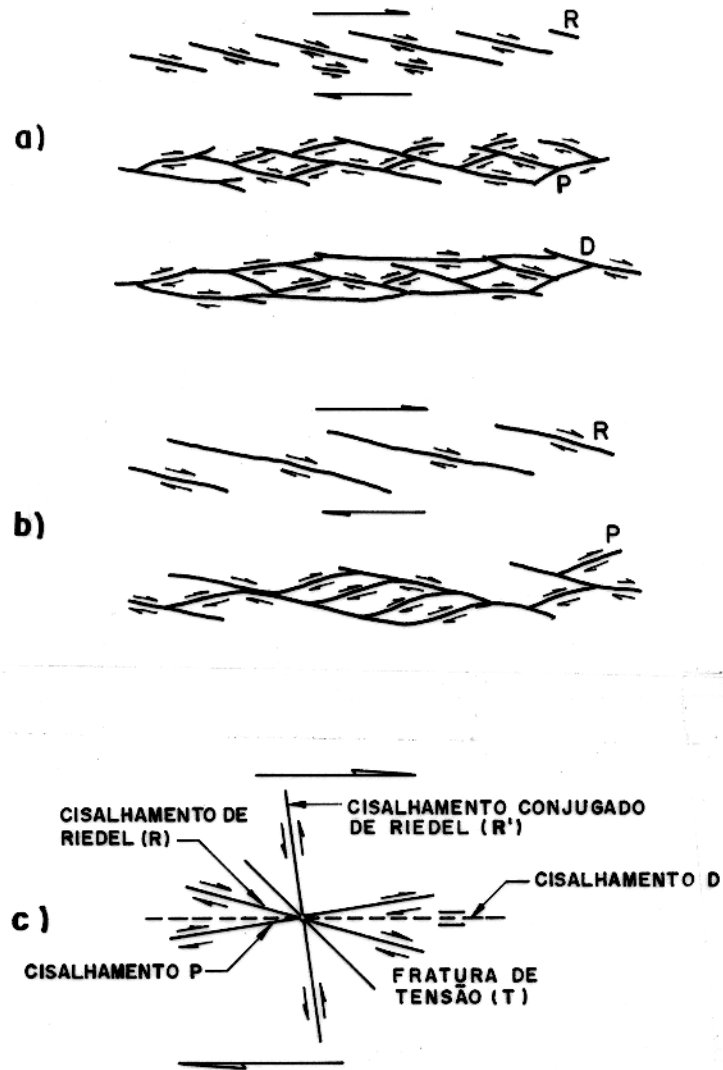
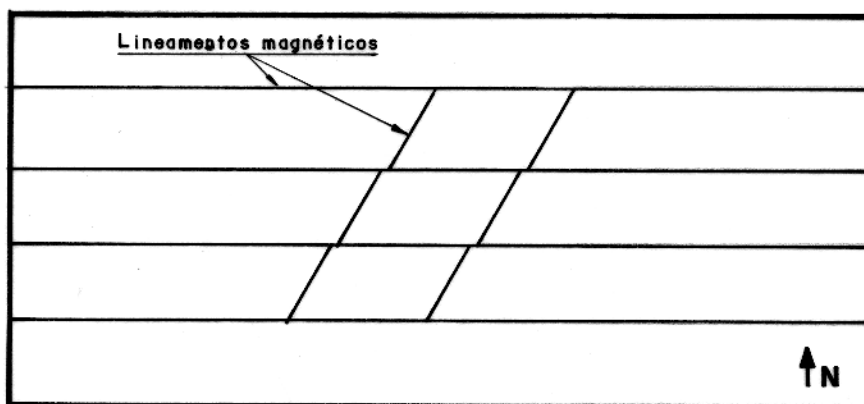
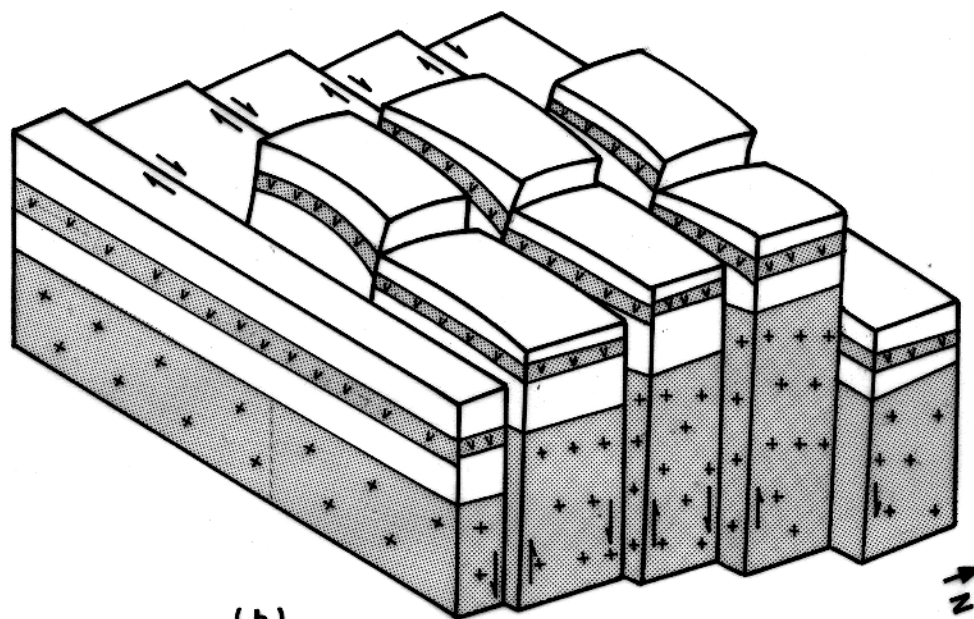


Figura 35 – Esquema de formação dos duplexes de Reidel (modificado de Hasui e Costa, 1991). Em (a) as falhas R,P, e D formadas sucessivamente articulam-se. Em (b), as falhas R e P são envolvidas. Em (c), a terminologia de cisalhamento de Reidel.



(a)



(b)

Figura 36 – Associação do padrão geral estabelecido pelos lineamentos magnéticos observados nas imagens digitais (a), e estruturas tectônicas de ejeção formadas a partir de um regime transpressivo associado ao recobrimento lateral entre zonas transcorrentes dexas (b).

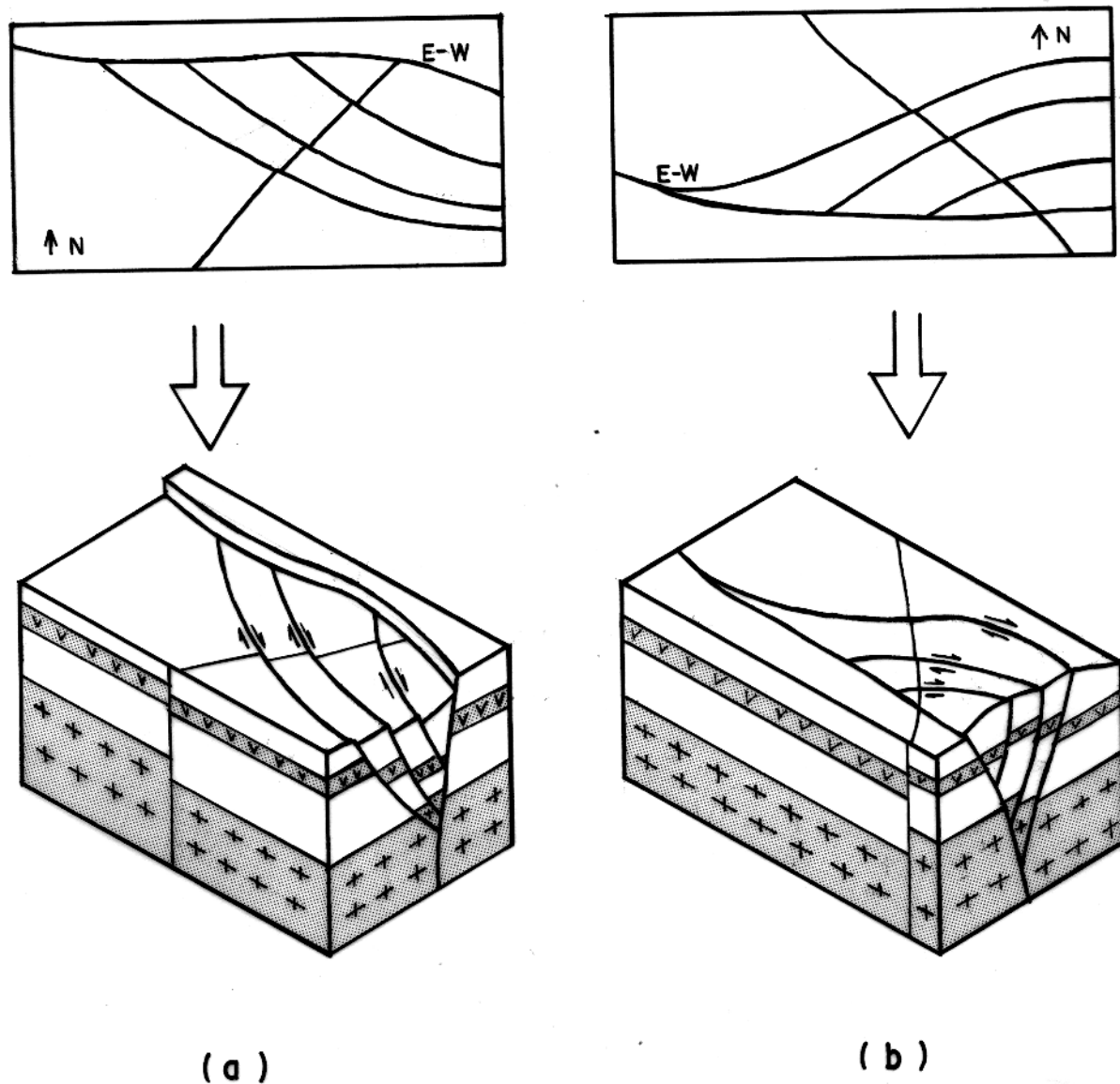


Figura 37 – Associação de padrões magnéticos observados nas imagens digitais, com estruturas geológicas lineares que sugerem a presença de falhas em flor negativas (a) e positivas (b).

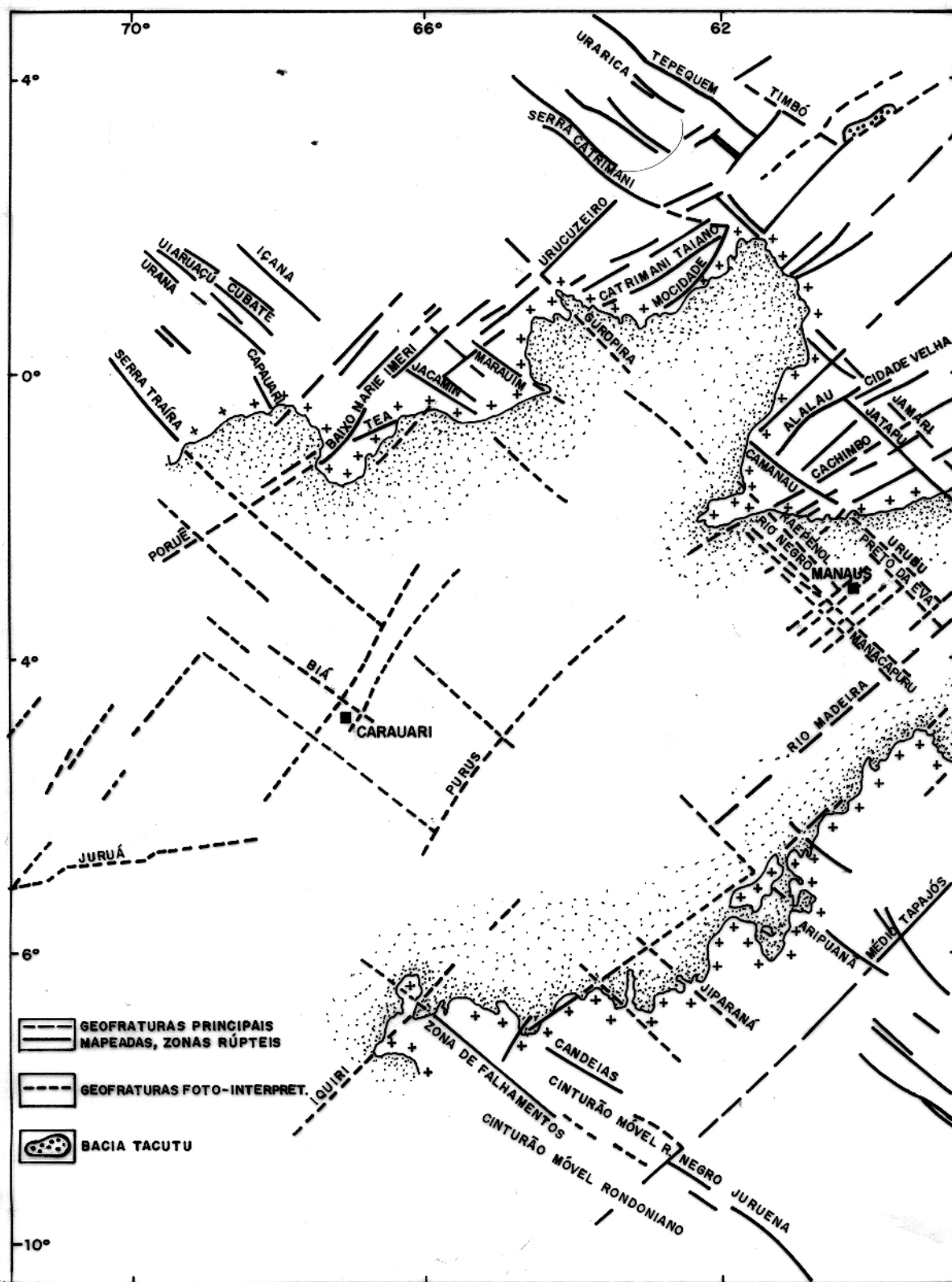


Figura 38 – Lineamentos geológicos principais presentes no Craton Amazônico (modificado de Cordani et al., 1984).

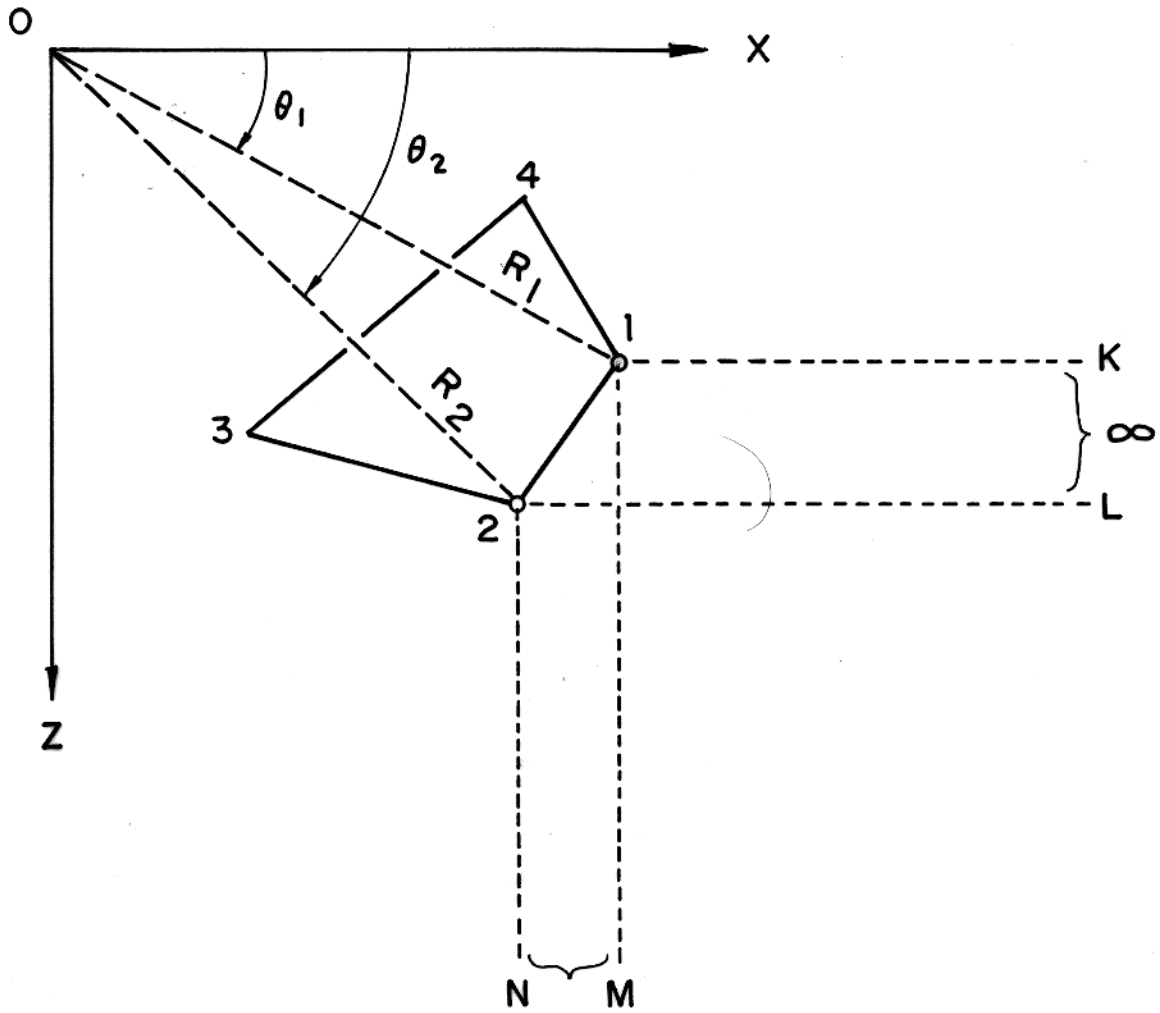


Figura 39 – Sistema de coordenadas X-Z de uma seção transversal a um corpo poligonal de vértices 1-2-3-4 (modificado de Shuey e Matthews, 1972).



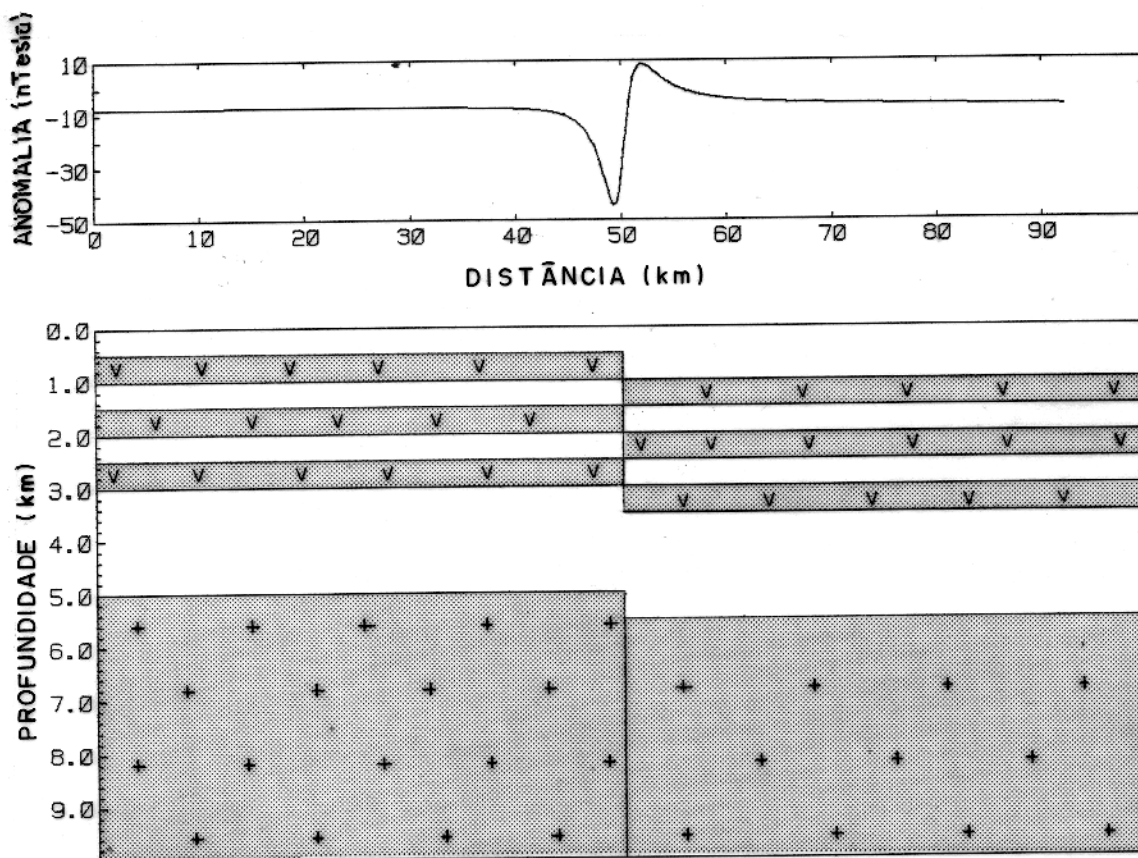


Figura 40 – Modelo bidimensional, que simula um falhamento que desloca verticalmente níveis de soleiras e o embasamento, mostrando que um baixo magnético, estará associado ao bloco soerguido. Os parâmetros utilizados foram 28000 nT para a intensidade do campo magnético local,  $17^{\circ}$  para a inclinação,  $-7^{\circ}$  para a declinação, 0.006 ucgs e 0.0017 ucgs respectivamente para a susceptibilidade magnética das soleiras e do embasamento.

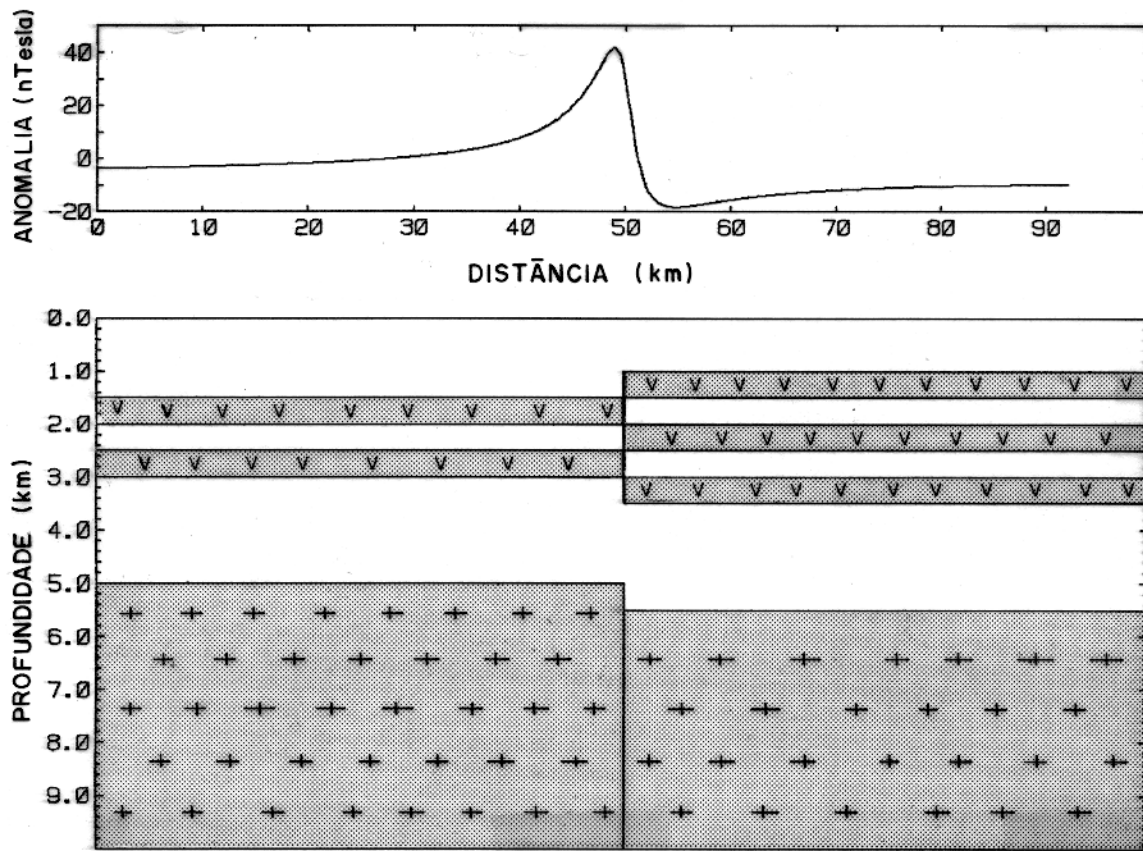


Figura 41 – Modelo bidimensional, simulando um falhamento que desloca verticalmente níveis de soleira e o embasamento. Neste caso é mostrado que a ausência de um nível de soleira acima do bloco soerguido, promove a presença de um alto magnético sobre esta região. Os parâmetros físicos utilizados são os mesmos da figura 40.

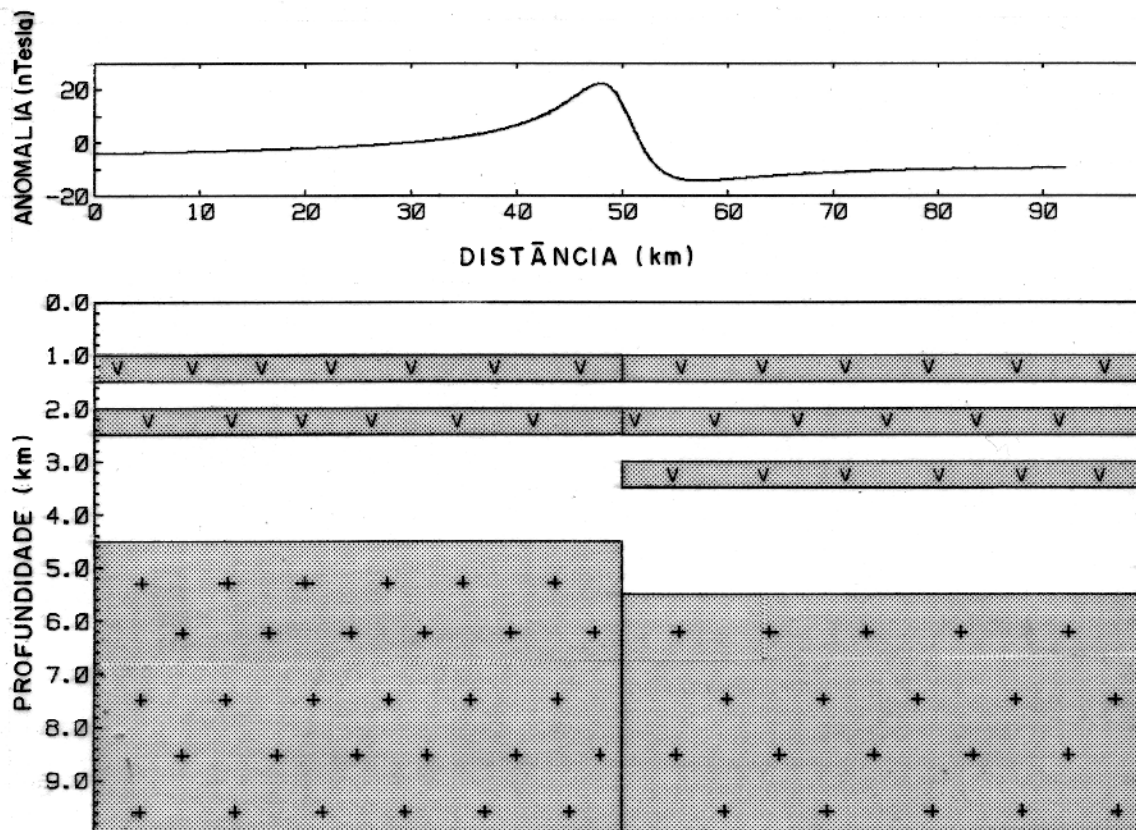


Figura 42 – Modelo bidimensional, mostrando uma variante do modelo da figura 41. Neste caso, além da ausência de um nível de soleira, o plano de falha promove um contato lateral entre dois níveis diferentes de soleiras, o que conseqüentemente dará origem a um alto magnético sobre o bloco soerguido.

OBSERVADO x CALCULADO

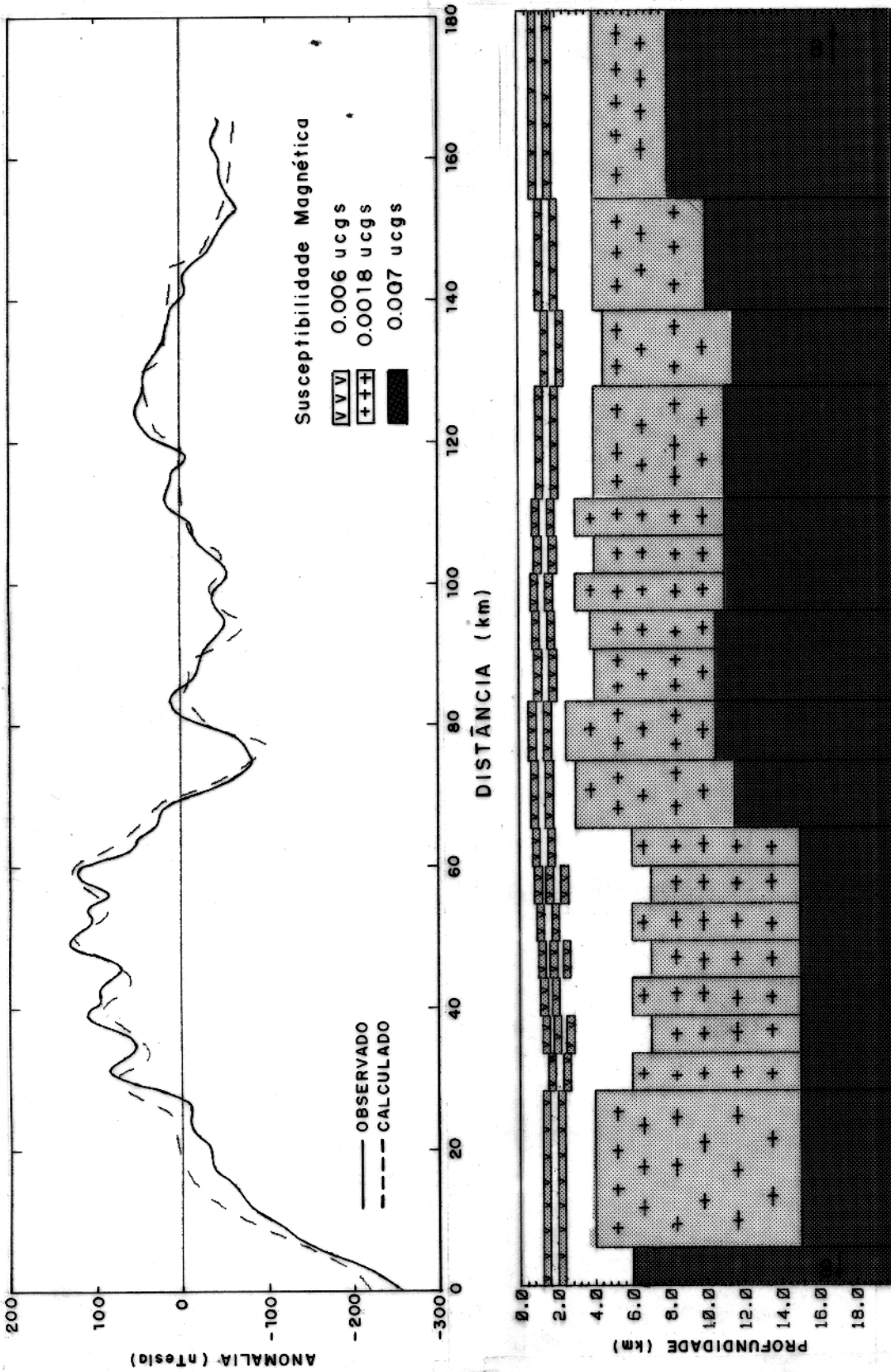


Figura 43 - Modelo 1, baseado na superposição de prismas bidimensionais, mostrando uma interpretação possível para a presença de altos magnéticos associados a regiões onde há um predomínio de fontes de alta frequência. A intensidade do campo magnético terrestre utilizado é 28000 nTesla, com inclinação de 17° e declinação de -7°.

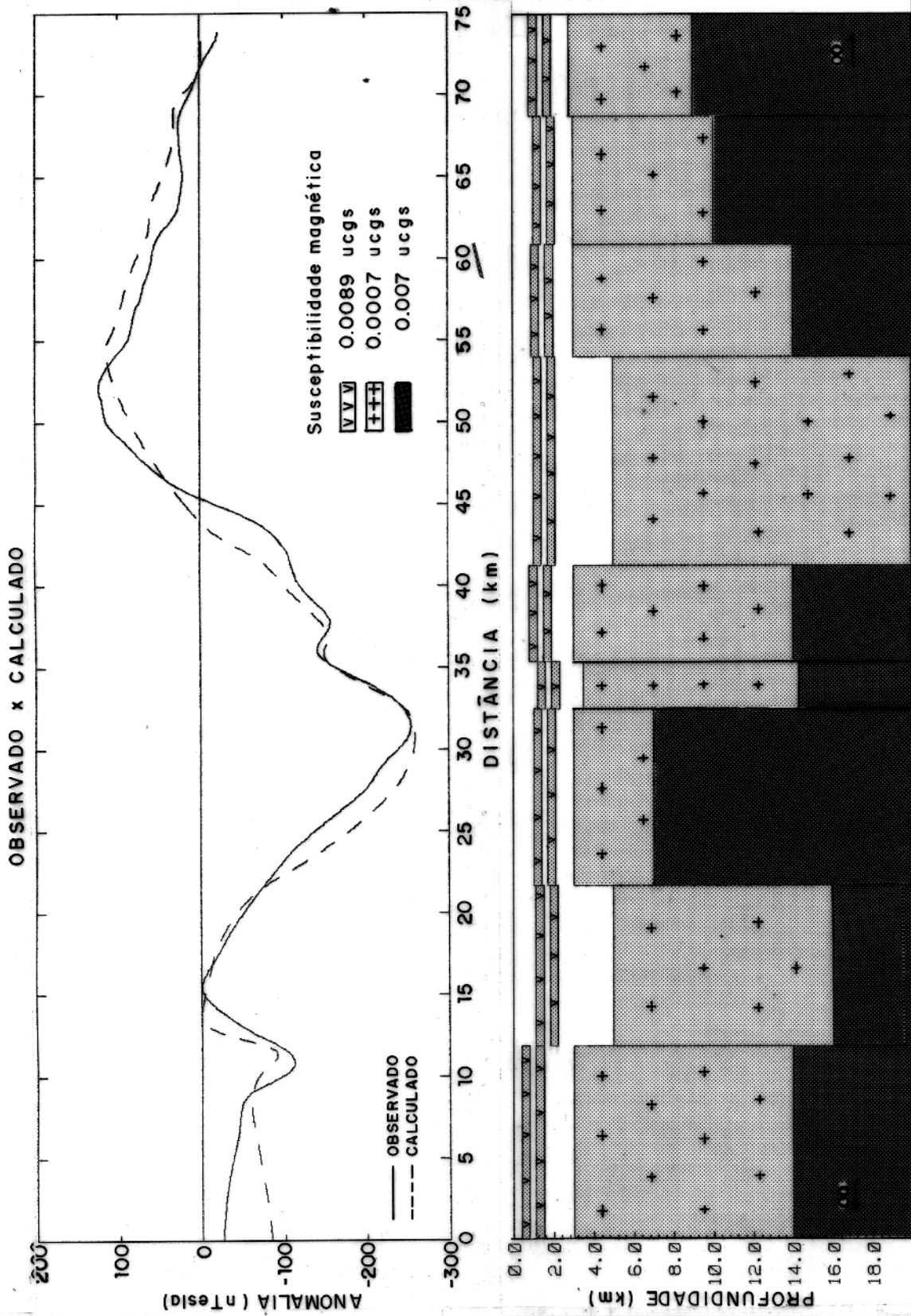
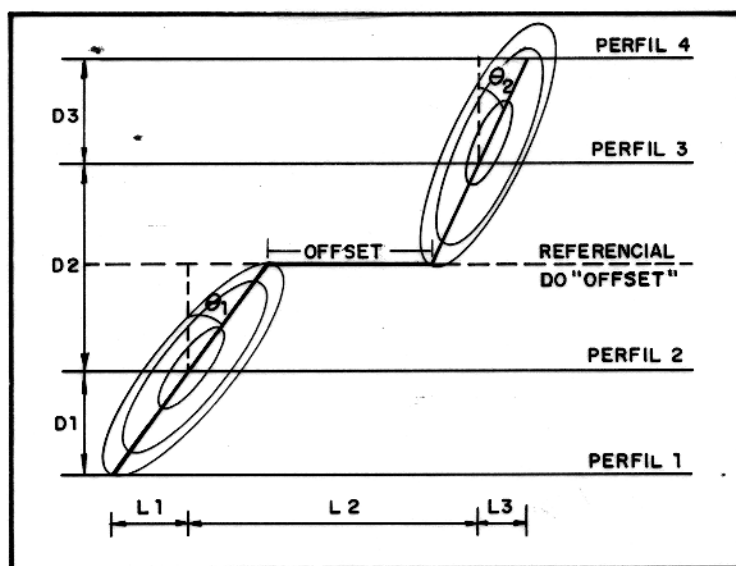
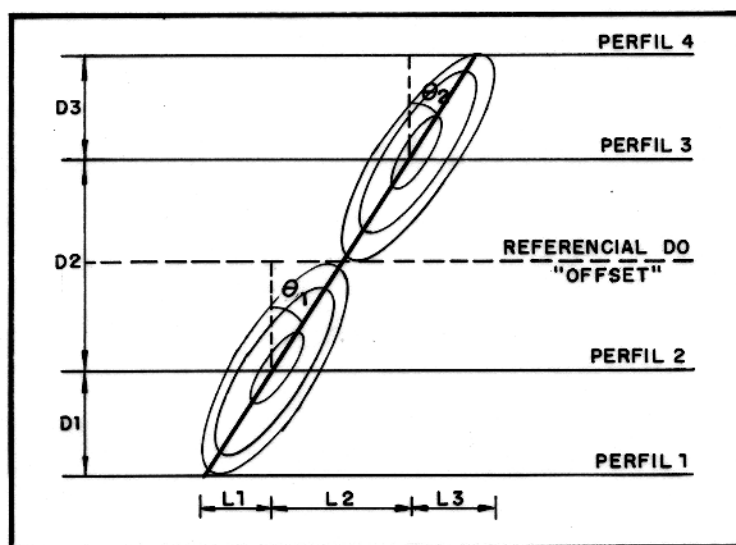


Figura 44 - Modelo 2, baseado na superposição de prismas bidimensionais, evidenciando a presença de uma superposição de fontes profundas intraembasamento e fontes rasas associadas a níveis de soleiras. A intensidade do campo magnético terrestre utilizado é 28000 nTesla, com inclinação de 17° e declinação de -7°.



(a)



(b)

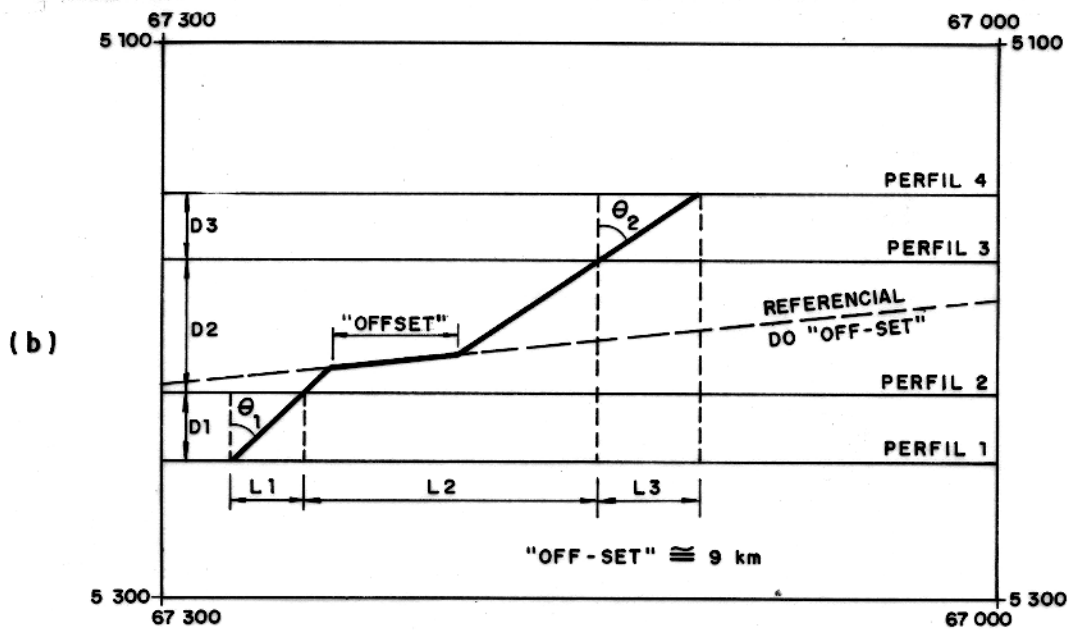
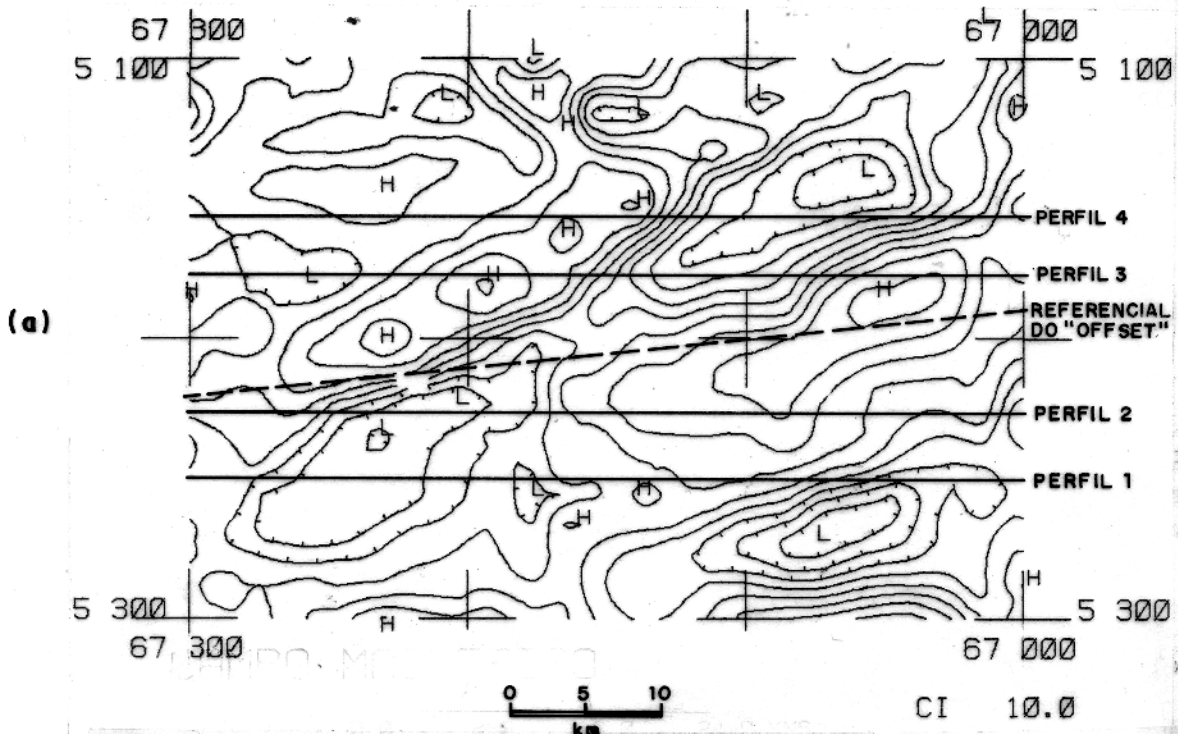
$L_1, L_2, L_3$  = DESLOCAMENTOS NO DOMÍNIO DO ESPAÇO, QUE FORNECEM A MAIOR VALOR DA CROSS-COVARIANÇA ENTRE OS PERFIS 1-2, 2-3 e 3-4 RESPECTIVAMENTE.

$D_1, D_2, D_3$  = DISTÂNCIA ENTRE OS PERFIS 1-2, 2-3 e 3-4 RESPECTIVAMENTE.

$$\theta_i = \text{Arctan} \left( \frac{L_i}{D_i} \right)$$

 = SINAL ANÔMALO

Figura 45 – Metodologia adotada para analisar a presença de 'offsets' nos lineamentos magnéticos, através dos conceitos de cross-covariância. Em (a), é caracterizada a presença de um 'offset' entre os dois pares de perfis correlacionados. Em (b) a coincidência entre as retas associadas aos dois pares de perfis correlacionados define a ausência de 'offset' entre essas anomalias.



DISTÂNCIA (km)	DESLOCAMENTO(km)	ÂNGULO	"OFFSET"(km)
D1 = 3,870	L1 = 4,4	$\theta_1 = 48,0^\circ$	9,0
D2 = 9,031	L2 = 19,6		
D3 = 3,870	L3 = 6,0	$\theta_2 = 57,0^\circ$	

Figura 46 – Constatação, através da cross-covariância, da presença de um 'offset' dextral(b) associado a lineamentos magnéticos NE-SW, presentes numa sub-àrea do Projeto Carauari Sul (a).



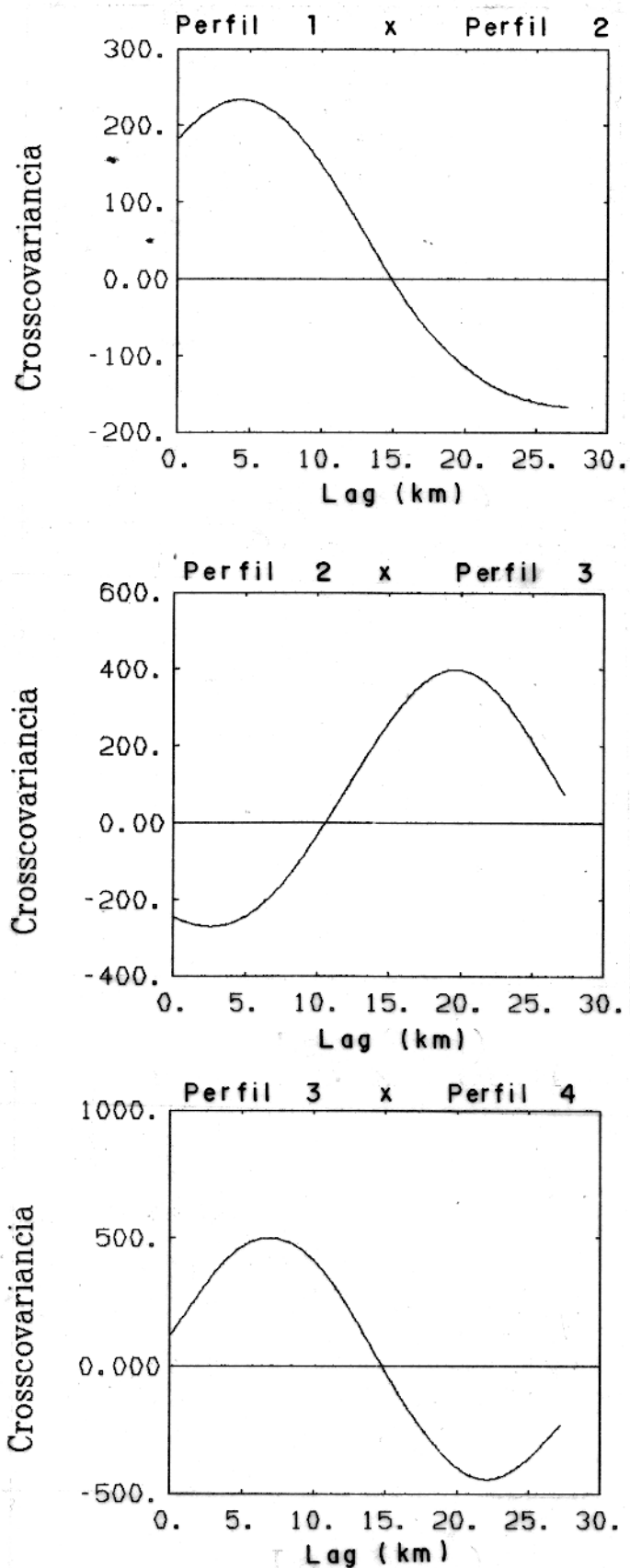
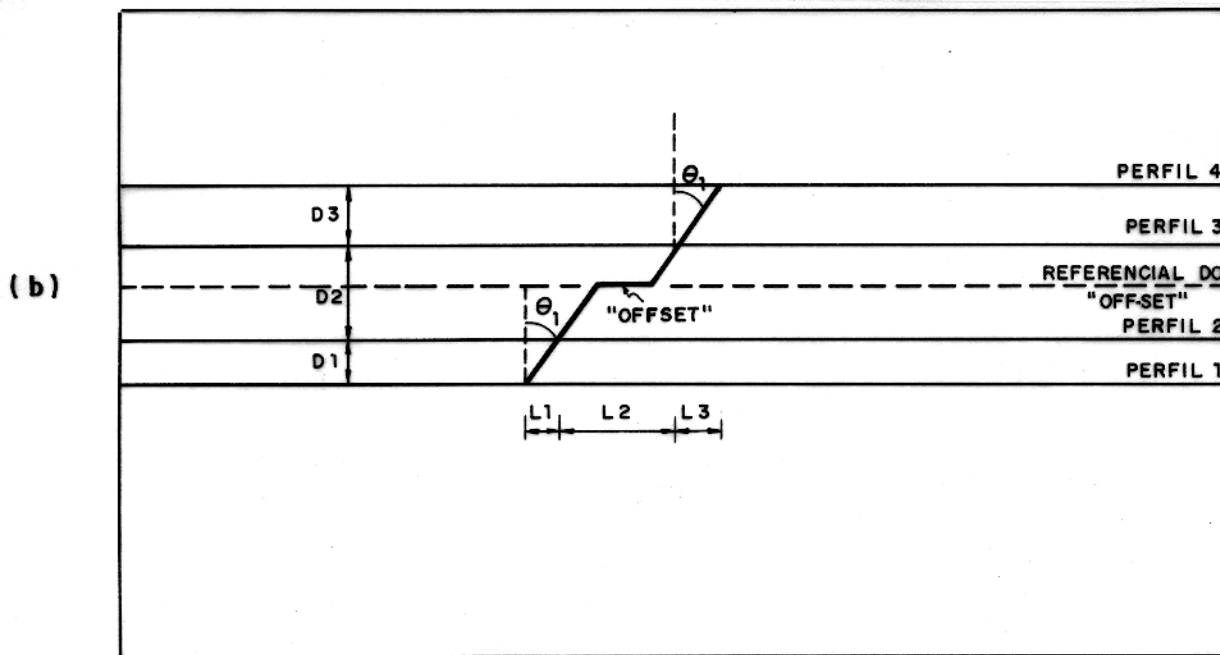
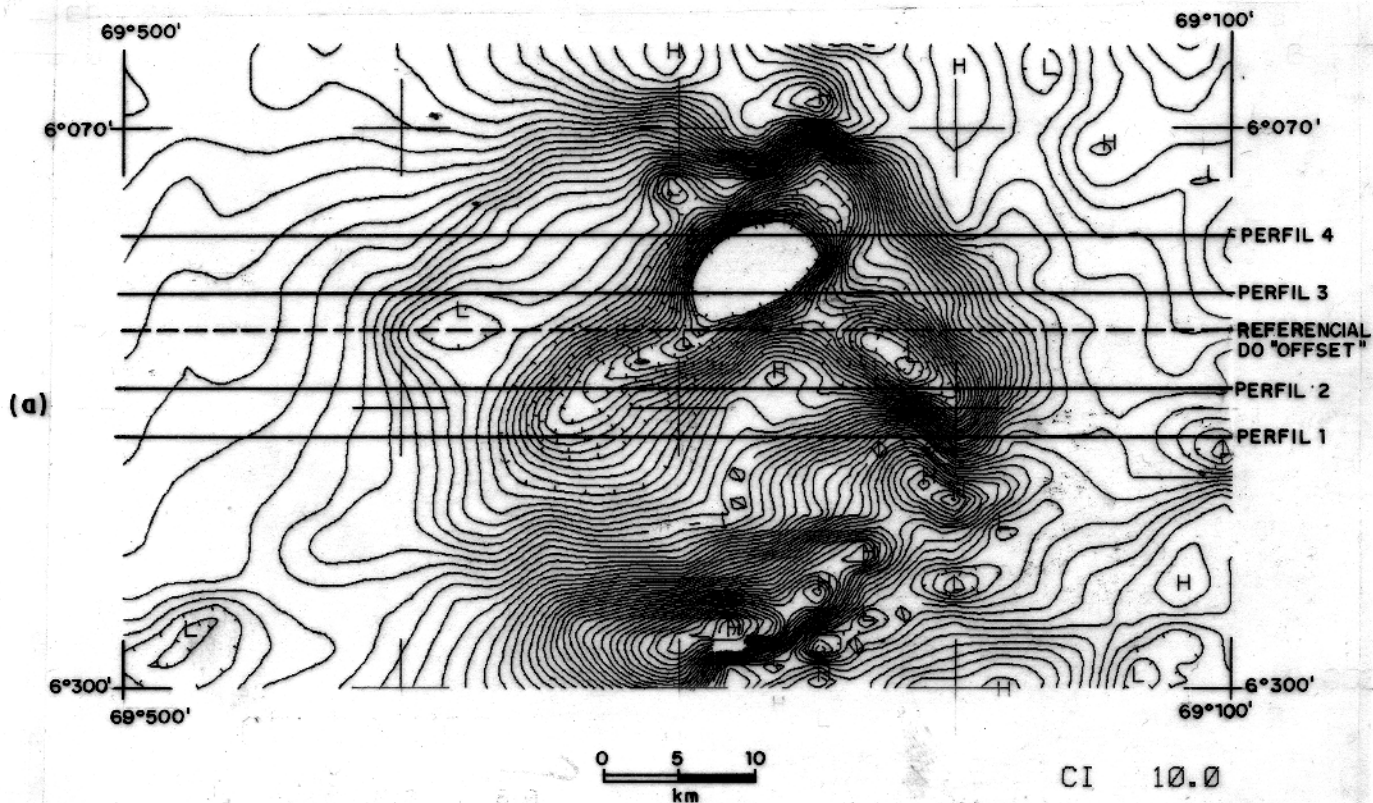


Figura 47 – Representação gráfica dos valores da cross-covariância, obtidos entre os perfis correlacionados referentes a sub-área do Projeto Carauari Sul (figura 46), mostrando o melhor valor do deslocamento 'lag' que proporciona o maior valor positivo da cross-covariância entre cada par de perfis.





DISTÂNCIA (km)	DESLOCAMENTO (km)	ÂNGULO	"OFFSET" (km)
D1 = 3,501	L1 = 2,4	$\theta_1 = 31^\circ$	4,0
D2 = 6,816	L2 = 8,6	$\theta_1 = 37^\circ$	
D3 = 4,053	L3 = 2,4		

Figura 48 – Constatação, através da cross-covariância, da presença de um 'offset' dextral (b), associado aos lineamentos magnéticos NE-SW que limitam as regiões caracterizadas pela predominância relativa de fontes de alta e baixa frequência, localizada numa sub-área do Projeto Jutai (a).

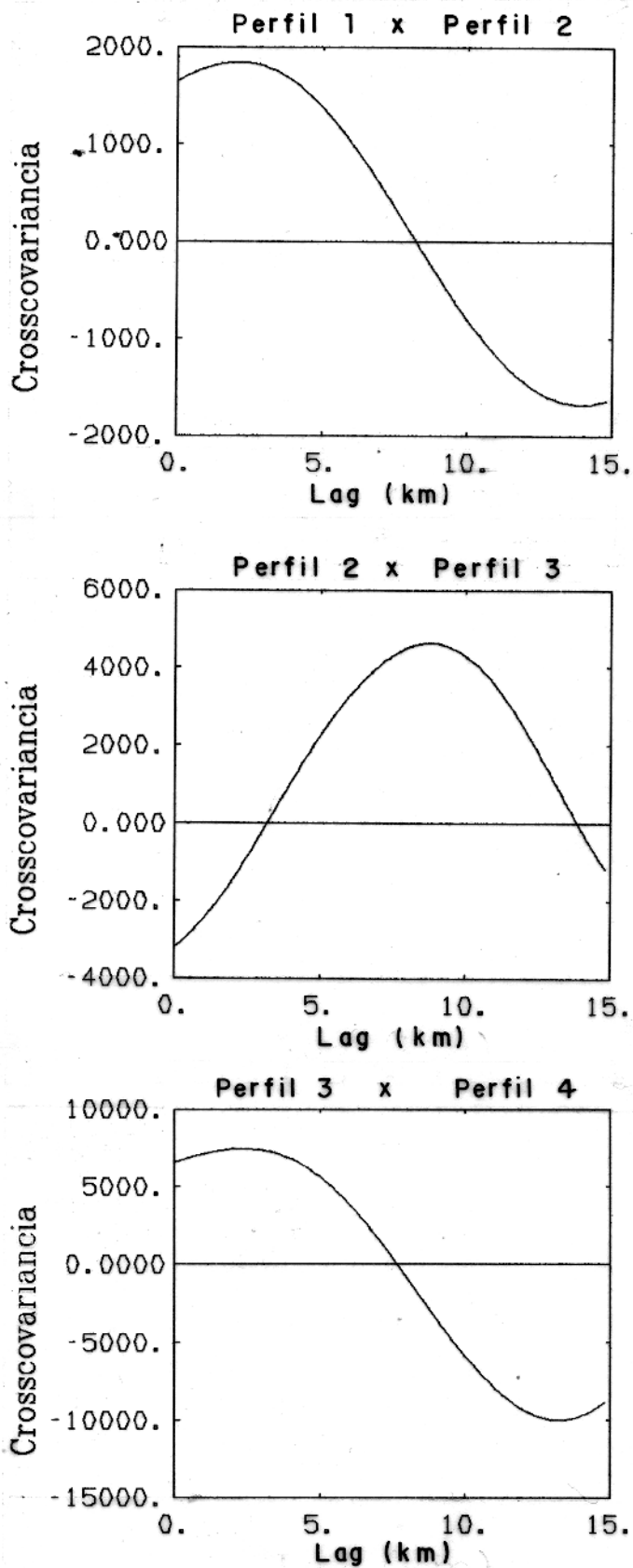
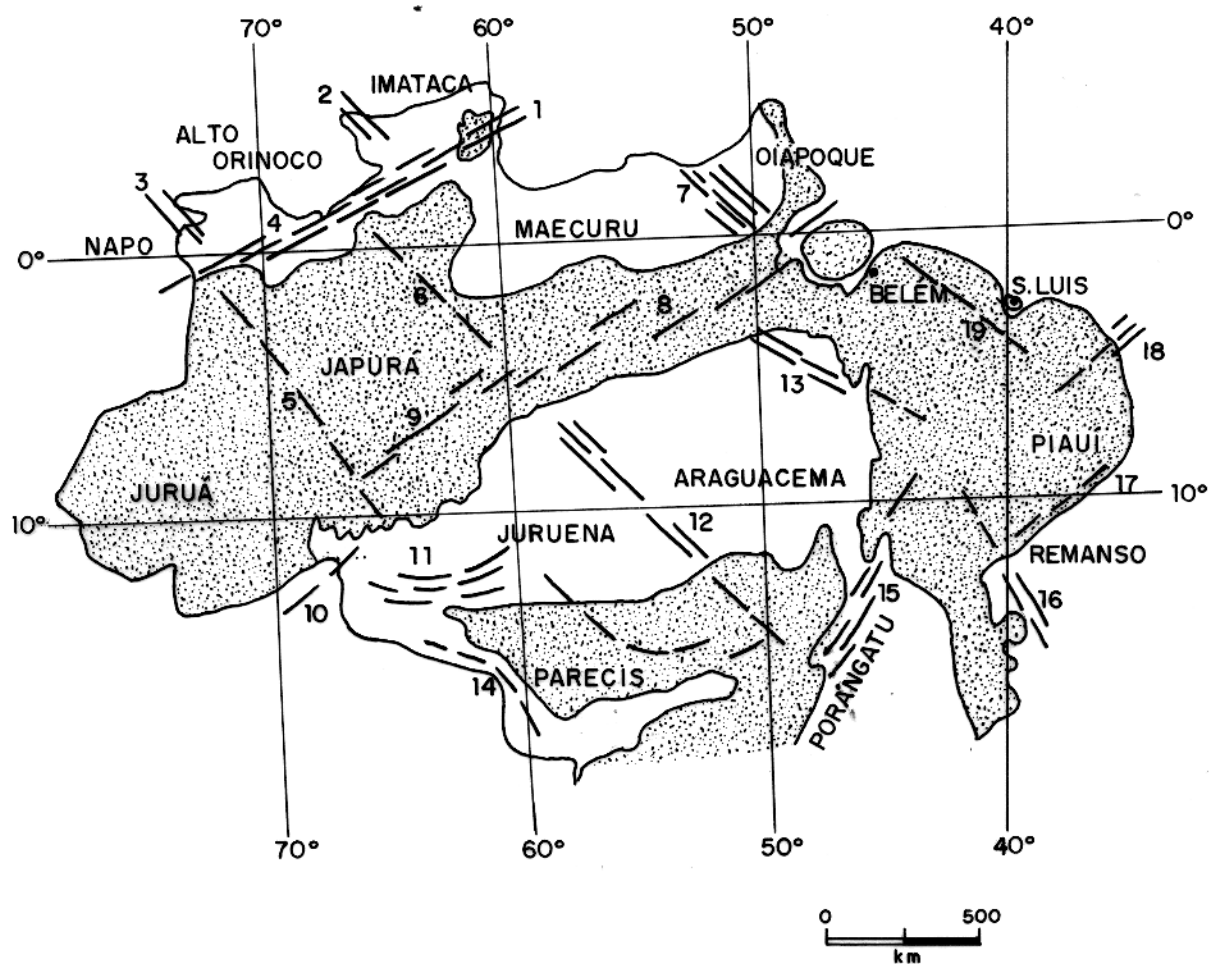
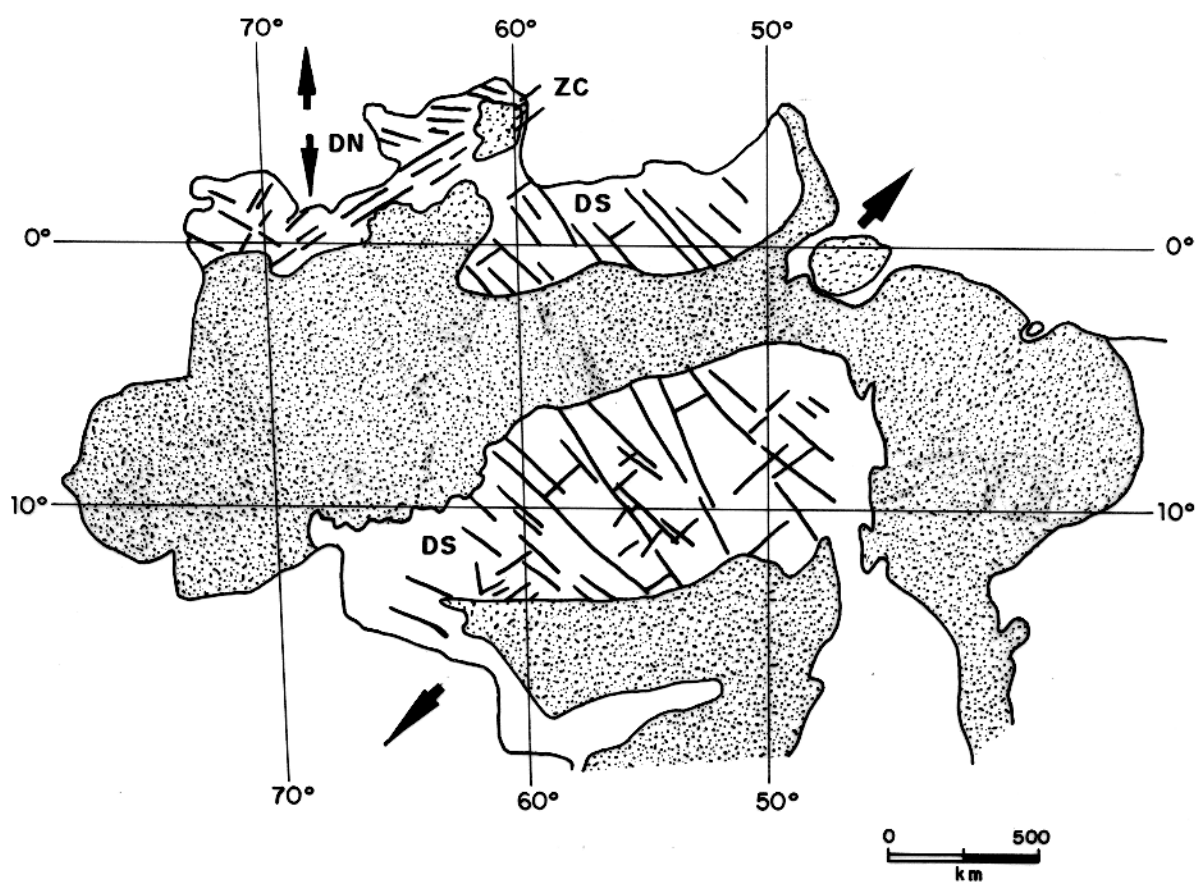


Figura 49 – Representação gráfica dos valores da cross-covariância, obtidos entre os perfis correlacionados referentes a sub-área do Projeto Jutai (figura 48), mostrando o melhor valor do deslocamento 'lag' que proporciona o maior valor positivo da cross-covariância entre cada par de perfis.



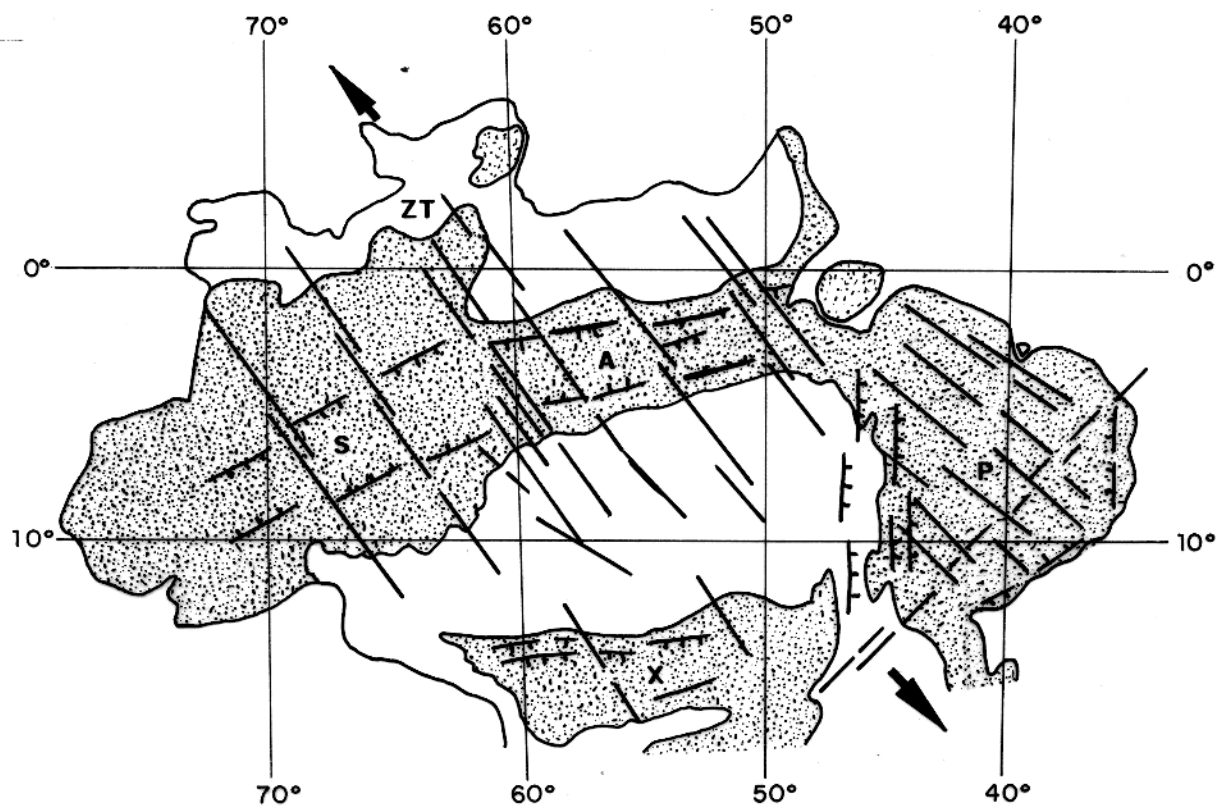
- |                          |                      |
|--------------------------|----------------------|
| 1 - GUIANA CENTRAL       | 10 - ABUNÃ           |
| 2 - PARIMA               | 11 - RONDÔNIA        |
| 3 - UAUPES               | 12 - MÉDIO TAPAJÓS   |
| 4 - NORDESTE DO AMAZONAS | 13 - CENTRAL DO PARÁ |
| 5 - BAIXO JURUÁ          | 14 - GUAPORÉ         |
| 6 - RIO NEGRO            | 15 - PORTO NACIONAL  |
| 7 - JARI                 | 16 - BOQUEIRÃO       |
| 8 - BAIXO AMAZONAS       | 17 - SUL DO PIAUÍ    |
| 9 - MADEIRA              | 18 - GRANJA          |
|                          | 19 - GURUPI          |

Figura 50 – Compartimentação arqueana, mostrando os núcleos de terrenos granito-’greenstones’ separados por descontinuidades crustais (Costa e Hasui, 1991).



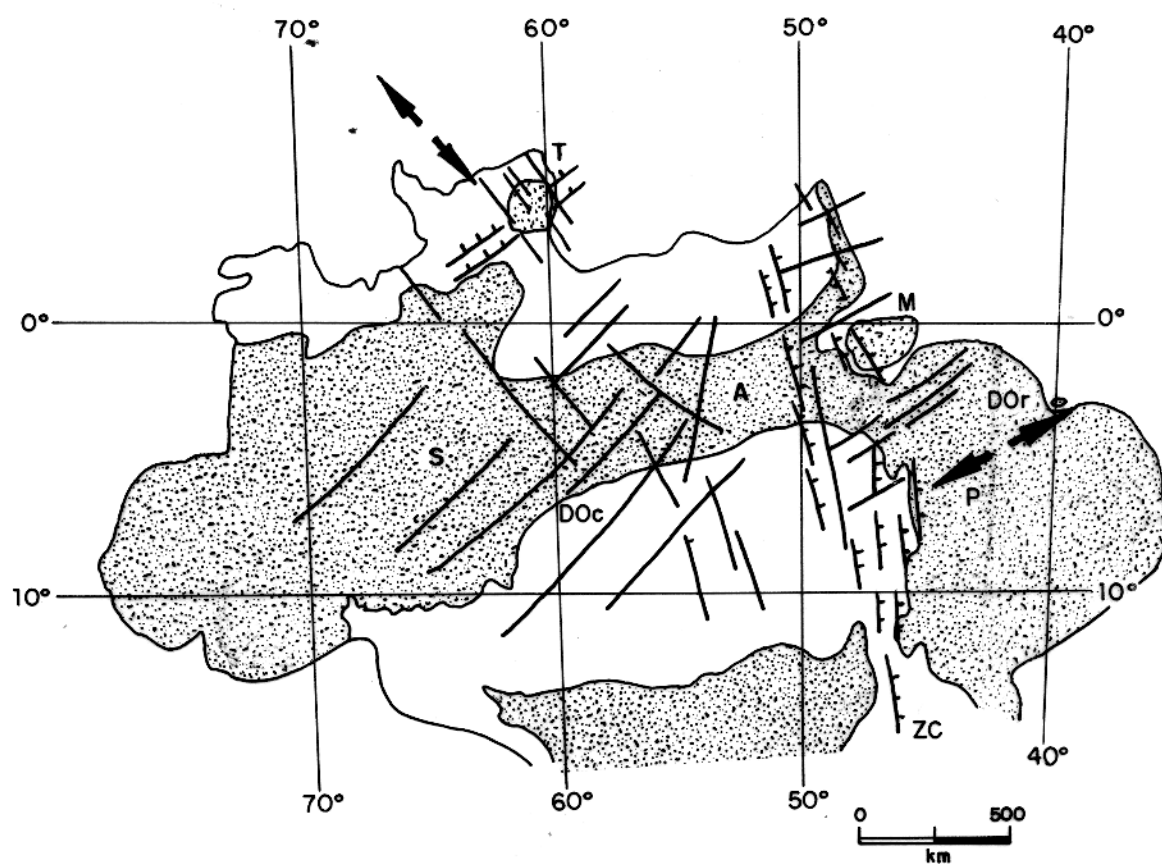
DN - DOMÍNIO NORTE - ESTENSÃO N - S  
 ZC - ZONA COMPARTIMENTAL BOA VISTA - CARACARÁ  
 DS - DOMÍNIO SUL - EXTENSÃO NE - SW

Figura 51 - Arcabouço tectônico estrutural do Proterozóico Médio (Costa e Hasui, 1991)



- S** - Bacia do Solimões  
**A** - Bacia do Amazonas  
**P** - Bacia do Parnaíba  
**X** - Parecis - Alto Xingu  
**ZT** - Zona de Transferência Purus

Figura 52 – Arcabouço tectônico-estrutural do Paleozóico (Costa e Hasui, 1991)



- S - BACIA DO SOLIMÕES**  
**A - BACIA DO AMAZONAS**  
**M - BACIA DO MARAJÓ**  
**P - BACIA DO PARNAÍBA**  
**Zc- ZONA COMPARTIMENTAL DO ARAGUAIA**  
**DOr- DOMÍNIO ORIENTAL - EXTENSÃO NW-WSW**  
**DOc- DOMÍNIO OCIDENTAL - EXTENSÃO NW-SE**

Figura 53 – Arcabouço tectônico-estrutural do Mesozóico (Costa e Hasui, 1991)

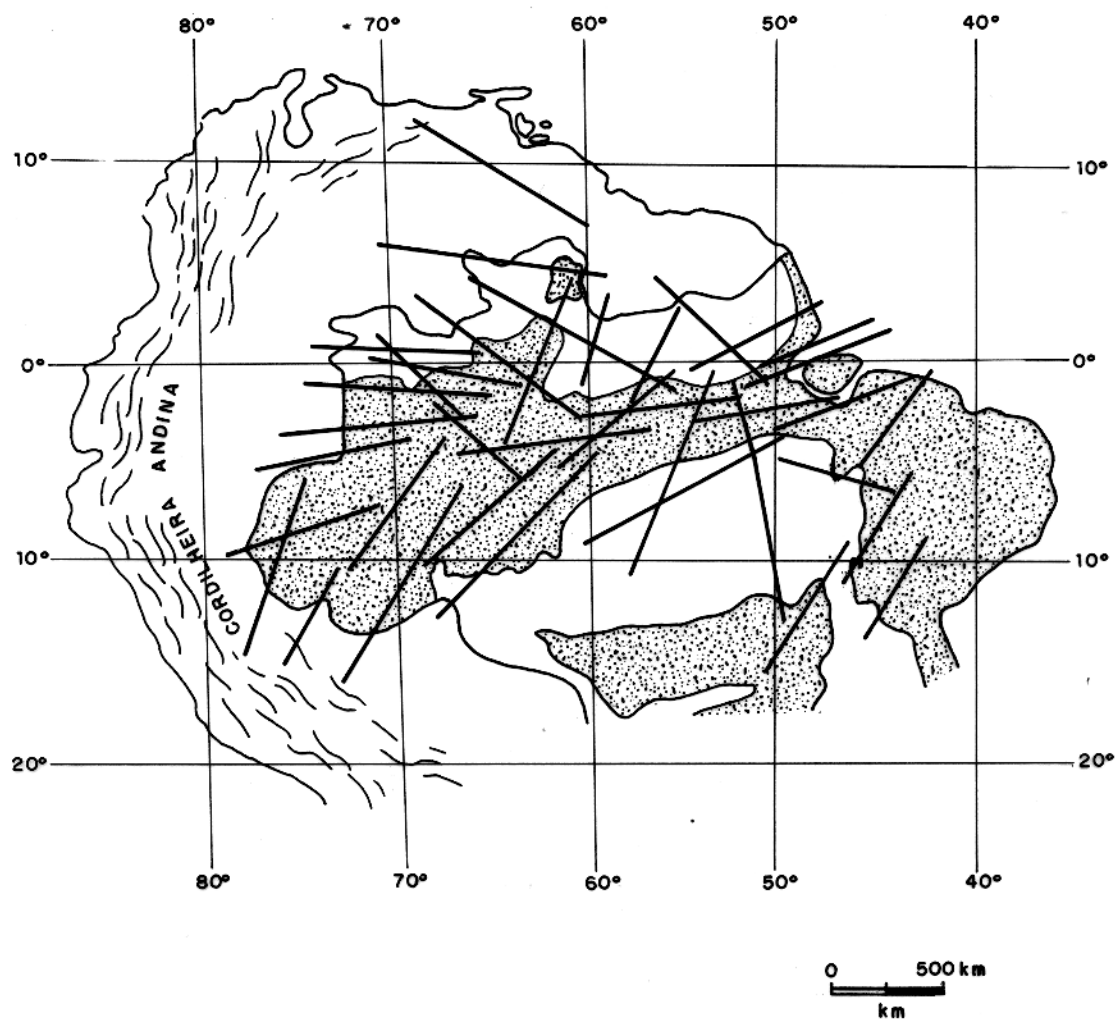


Figura 54 – Arcabouço tectônico-estrutural do Terciário Inferior Médio (Paleoceno–Oligoceno)  
(Bemerguy e Costa, 1991)

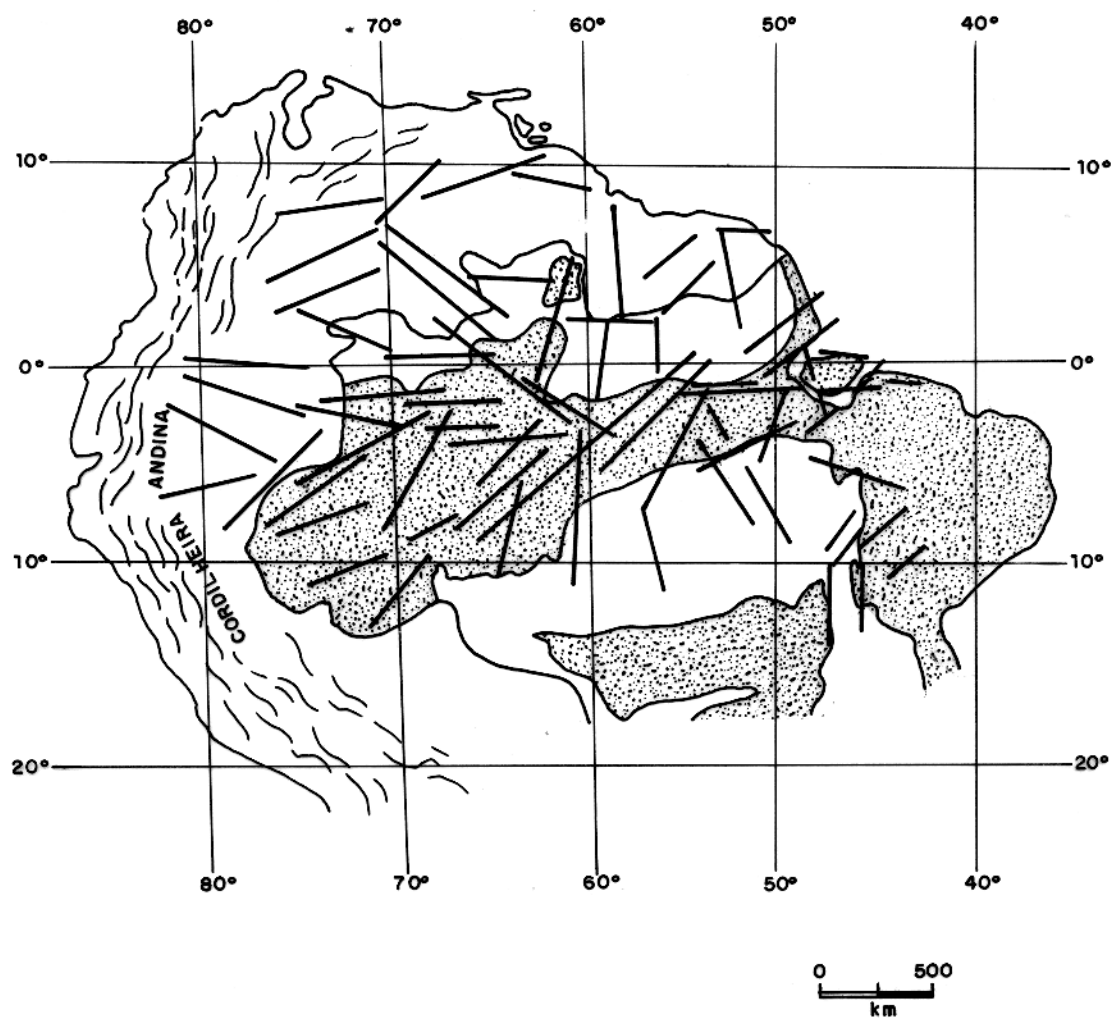


Figura 55 – Arcabouço tectônico-estrutural do Terciário Superior (Bemerguy e Costa, 1991)