

Levantamento Gravimétrico em Crixás e Itapaci, GO

“O senso comum diria que o pêndulo levava mais tempo a descrever um arco de maior amplitude do que um menor, mas o jovem Galileu Galilei apercebeu-se de que não era isso que sucedia. Como não tinha relógio, mediu o tempo de cada oscilação pelo pulsar do seu próprio sangue. E o bater do seu coração confirmou-lhe que o que intuía estava certo.”

DONALD C. PEATTIE sobre GALILEU GALILEI, cientista italiano que nasceu em 1564 em Pisa e morreu em 1642, ano em que nasceu Isaac Newton.

6.1 APRESENTAÇÃO

O levantamento gravimétrico em Crixás e Itapaci, GO (LGCI), foi realizado na porção centro-norte do estado de Goiás, abrangendo uma área que compreende as cidades de Itapaci, Crixás, Guarinos, Hidrolina, Santa Terezinha de Goiás, Pilar de Goiás, Nova América e outras localidades cobrindo uma área aproximada de 9.000 km² (Figura-6.1). Foram coletados também alguns pontos nas regiões de Goiás e Faina mais ao sul.

O objetivo do LGCI envolve o adensamento da malha gravimétrica na região, já que se trata de área com terrenos tipo granitóide-*greenstone* de importância geocientífica e econômica. O adensamento da malha, embora ainda regional, permite que cada *greenstone belt* e complexo gnáissico (ver itens A1.1.1.1 e A1.1.1.2 do Apêndice 1) seja caracterizado quanto à propriedade física correspondente em superfície e em profundidade, mesmo que indiretamente e com o auxílio de outros levantamentos geofísicos (ex. PGBC; ver item 3.2).

O acesso principal à área se dá pela rodovia BR-153 (Belém-Brasília), até o Km 323 (~10km a norte de Jardim Paulista), onde há o entroncamento com a rodovia GO-154 que dá acesso à cidade de Itapaci. Essa rodovia também leva a Santa Terezinha de Goiás, de onde a rodovia GO-465 nos levará a Crixás (Figura-6.1). Outras rodovias estaduais (GO-156, GO-336, GO-338 e GO-545), estradas municipais, estradas vicinais e caminhos dão acesso a diversos pontos na área. Essas estradas e caminhos permitiram que se chegasse a uma densidade média de informação de aproximadamente 1 ponto a cada 20 km². Essa densidade média é coerente para uma escala de 1:250.000 de acordo com a Tabela 5.1.

A geologia da região é sintetizada nos itens A1.1.1.1 e A1.1.1.2 no Apêndice 1 e na Figura-6.2, que mostra o mapa geológico de Lacerda (1997) modificado e adaptado de acordo com a literatura.

Neste capítulo é apresentada e discutida a metodologia, sugerindo novos procedimentos. Em seguida, esses dados são tratados e interpretados.

6.2 METODOLOGIA

Para a coleta de dados, foi utilizado o gravímetro Lacoste & Romberg do Observatório Sismológico da Universidade de Brasília (SIS/IG/UnB) em várias etapas de campo. Esse gravímetro (Figura-6.3a), apesar de ser velho conhecido dos acadêmicos da universidade, apresenta baixa deriva (~0,01 mgal ao dia, desde que devidamente operado), é de fácil manuseio (uma pessoa é suficiente) e permitiu, com a prática, fazer até cinco medidas por hora a cada 5 km, usando-se um veículo automotor como transporte.

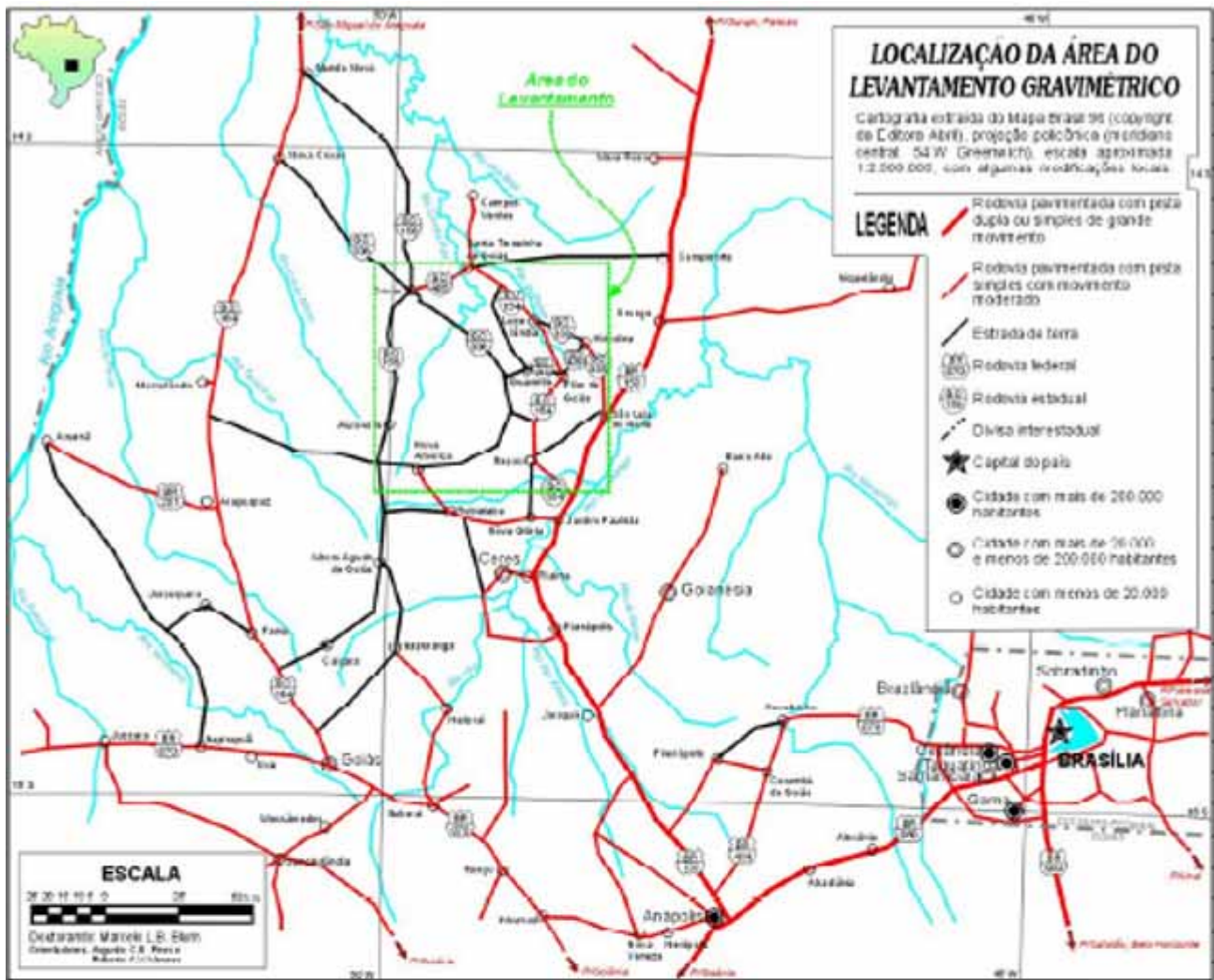


FIGURA 6.1

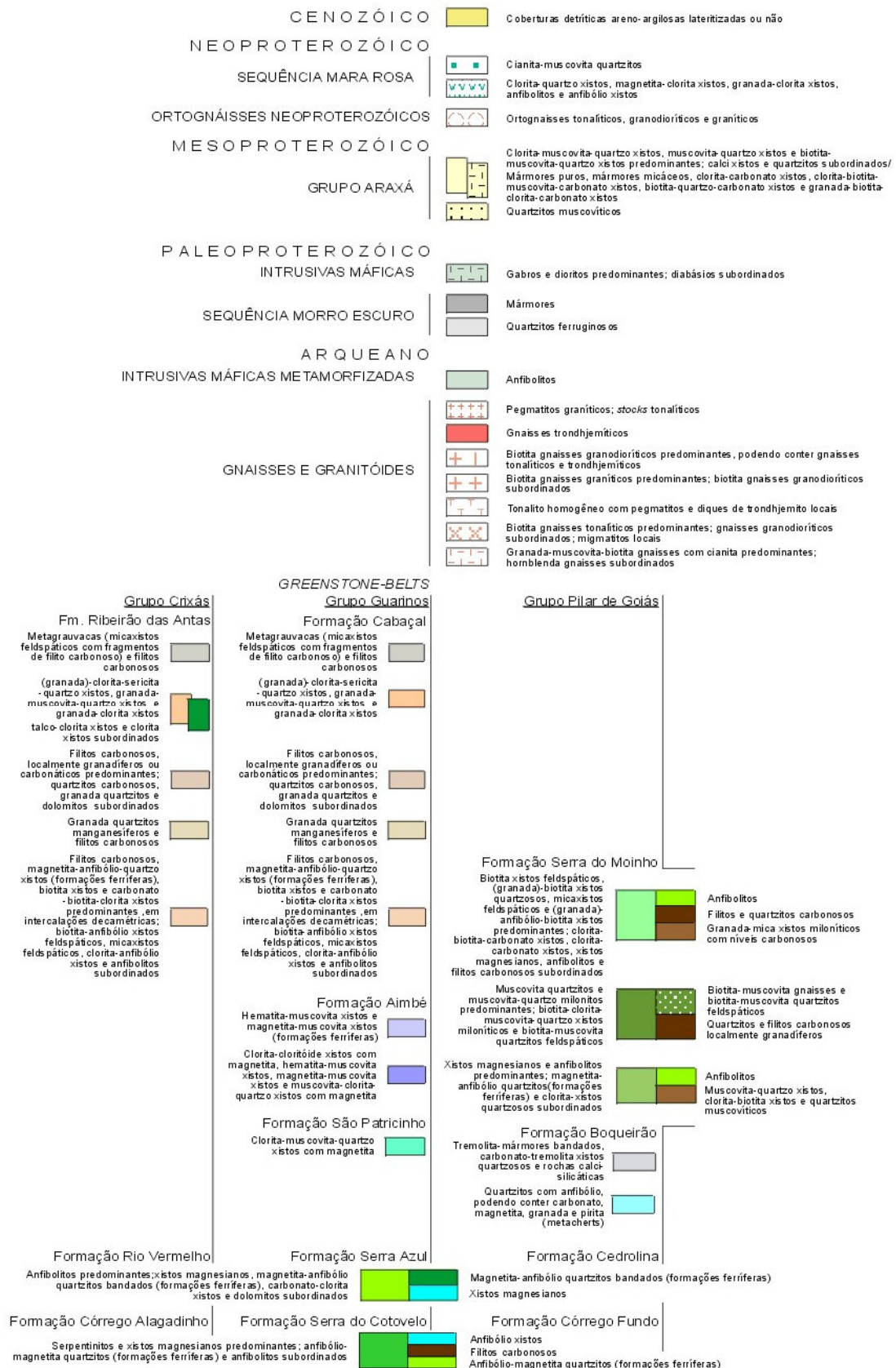


FIGURA 6.2: (continuação) Legenda do Mapa geológico das regiões de Crixás e Itapaci, GO.

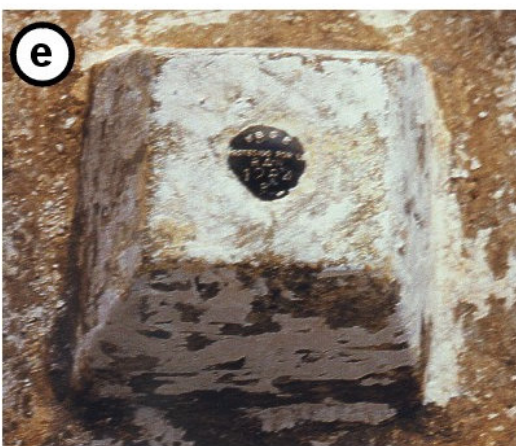
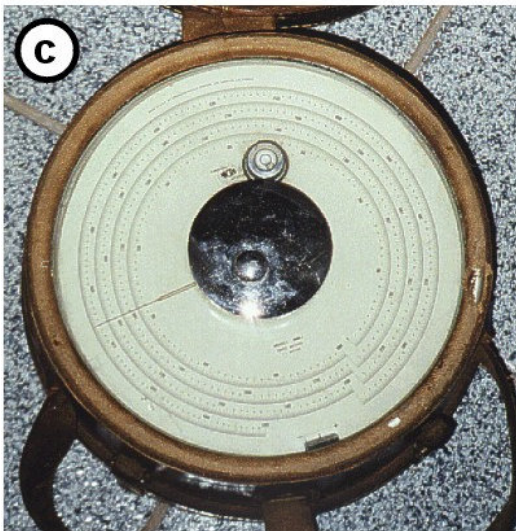
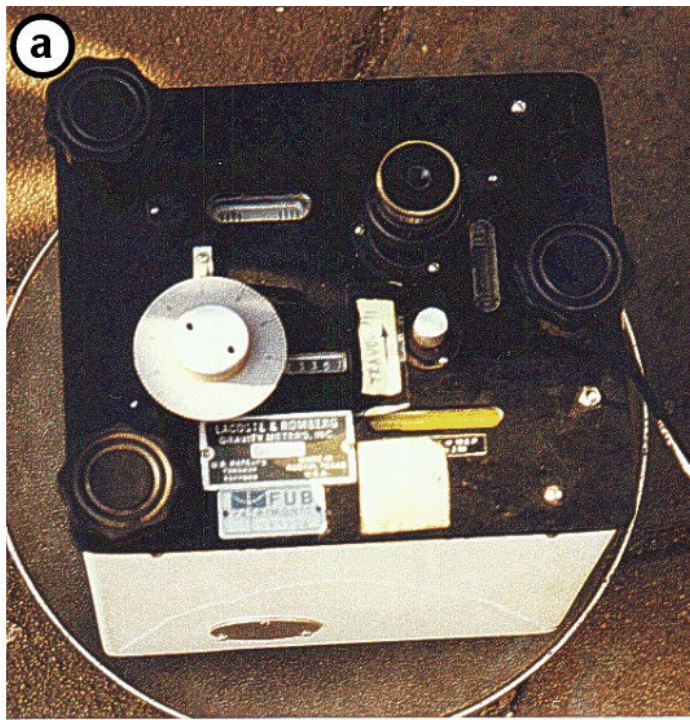


FIGURA 6.3: (a) Gravimetro Lacoste & Romberg da Universidade de Brasília utilizado no levantamento gravimétrico; (b) GPS 55 Garmin em funcionamento; (c) detalhe do Altimetro Paulin; (d) praça da Igreja de Itapaci-GO e o RN-1284-P no detalhe (e), onde se lê "I B G E PROTEGIDO POR LEI R N 1284 P".

As coordenadas horizontais foram obtidas via satélite com um GPS 55 AVD da Garmin International, Inc., portátil e de fácil operação (Figura-6.3b) e cujo erro horizontal aproximado é de 100 m.

As altitudes em relação ao nível do mar foram coletadas com o único altímetro Paulin (American Paulin System) do IG/UnB (Figura-6.3c). O aparelho tem precisão de metro e, segundo o fabricante, é isolado termicamente e que, portanto, a influência da temperatura do meio é mínima. No entanto, essa influência existe, e somada à variação da pressão torna a deriva significativa (~2 metros em um intervalo de medidas de uma hora no mesmo ponto em um dia quente). Para minimizar essa variação, foi aplicada a correção de pressão fazendo-se leituras em estações - base a cada 2, 3 ou 4 horas. Quando esse período foi ultrapassado em mais de uma hora, algumas estações foram refeitas aplicando-se as novas altitudes na correção das outras estações do período.

As estações - base foram definidas a partir da Rede Gravimétrica Fundamental Brasileira (Escobar 1980), usando as referências de nível RN-1284-P (Figura-6.3d, e) e RN-1283-C, que se localizam, respectivamente, na praça da igreja matriz de Itapaci e na entrada de escola municipal em Crixás. Todas as leituras de altitude e gravidade foram amarradas a essas referências. Os locais das novas estações - base foram situados em lugares de fácil acesso e reconhecimento (cruzamentos ou entroncamentos de vias e locais característicos como igrejas, capelas, escolas, entradas de fazendas, etc.).

As estações de leitura foram feitas com espaçamentos variando de 1 a 5 km em estradas, caminhos ou fazendas, dependendo das condições locais (acesso, topografia, clima e geologia conhecida). Procurou-se evitar terrenos muito acidentados e dias chuvosos, condições não favoráveis às leituras e à conservação dos aparelhos.

Em perfis sabidamente transversais aos *greenstone belts*, o espaçamento dos pontos foi de 1 a 2 km. Em qualquer outra situação geológica, esse espaçamento variou de 3 a 5 km. Pelo menos 1 a cada 5 pontos de leitura estava em local de fácil reconhecimento para facilitar qualquer retorno ou servir posteriormente como estação - base. As estações com leituras gravimétricas, altitude ou localização duvidosas foram eliminadas ou refeitas.

Foram aproveitados 396 pontos dos 401 coletados no LGCI (Figura-6.4) e mais 83 que foram coletados nas imediações de Goiás e Faina (Anexo I). Todas as leituras foram digitadas em arquivos tipo ASCII para sua redução em programa de computador desenvolvido durante o trabalho. Esse programa estima o efeito da maré terrestre devido ao Sol e à Lua (ver item 5.2.1.3 e subrotina no Apêndice 2(A)), calcula as correções de deriva do gravímetro e do altímetro, de latitude, de ar-livre e Bouguer (ver itens 5.2.1.2 e 5.2.1.4). A estimativa da correção de terreno (item 5.2.1.5) também foi incorporada ao programa e é feita por um método semelhante ao de Hammer (1939). O método exige que a topografia seja digitalizada. Foram usados dados digitais de satélite do Jet Propulsion Laboratory (maiores detalhes são encontrados em JPL 1997a, b). O programa também permite a estimativa de densidade por dois métodos distintos baseados em Nettleton (1939) e Parasnis (1972).

Para os pontos nas regiões de Goiás e Faina foram calculadas somente as anomalias Bouguer para o adensamento da malha regional.

A metodologia de correção de terreno e de determinações de densidade utilizadas são descritas a seguir. Acredita-se que após todas as correções a precisão final das medidas deve ser da ordem de 1,5 mGal.

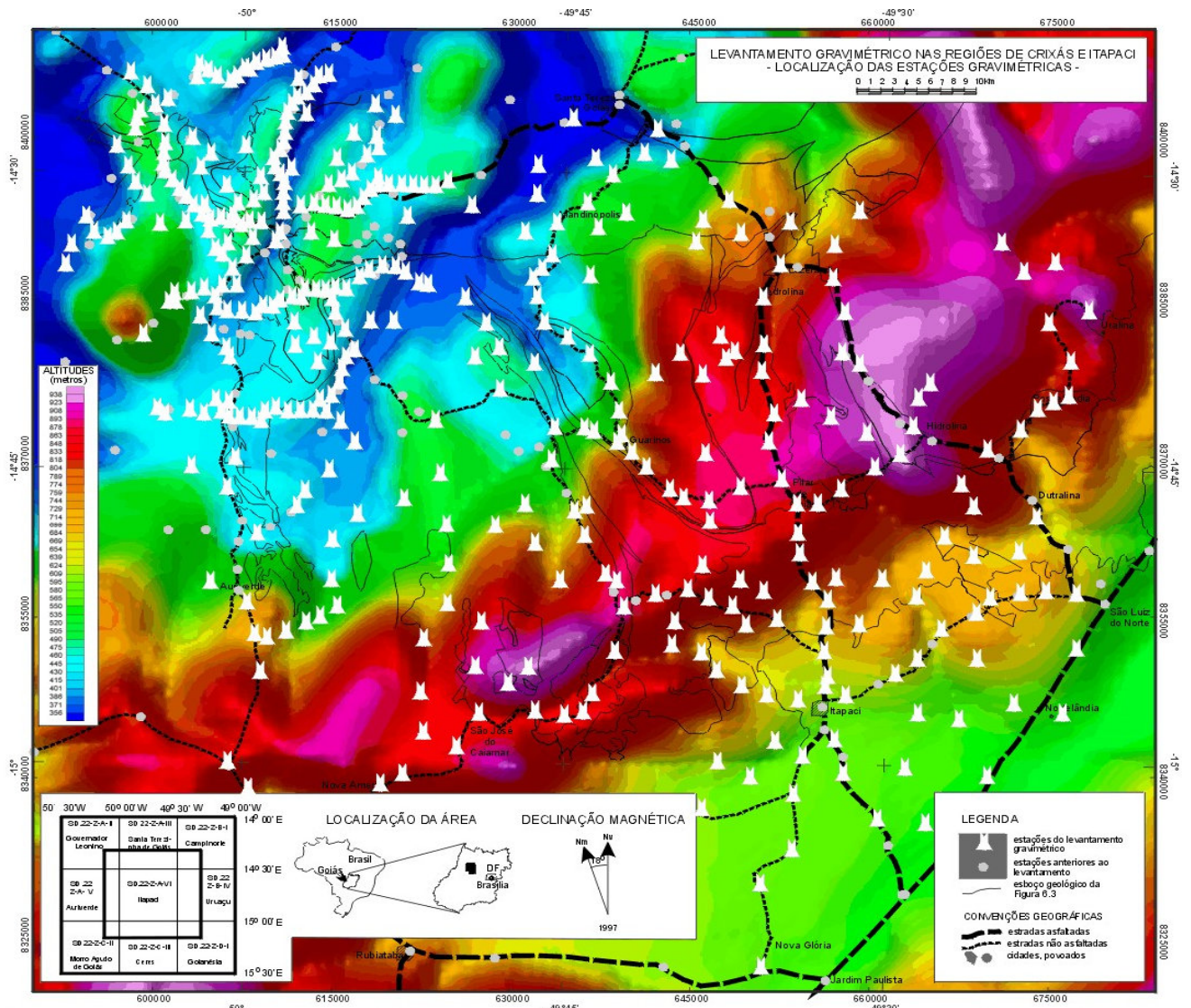


Figura 6.4: Localização das estações gravimétricas do LGCI sobre esboço geológico e topografia suavizada.

6.2.1 CORREÇÃO DIGITAL DE TERRENO

O método aqui elaborado se assemelha ao descrito por Hammer (1939), comentado no item 5.2.1.5.

O objetivo do método é corrigir, da melhor forma possível, o efeito da variação topográfica do terreno sobre as medidas gravitacionais em uma dada estação. Isso é feito utilizando um conjunto de estações gravimétricas e um conjunto de altitudes em relação ao nível do mar. Esses conjuntos deverão estar bem localizados no espaço e sua distribuição deverá ser aproximadamente regular no primeiro caso e necessariamente regular, malha com célula quadrada, no segundo.

O método consiste em utilizar um diagrama semelhante ao de Hammer (1939) sob a forma virtual com a mínima interferência do usuário. Esse controle é feito em sua maioria com operações simples e potências de 2. Com isso, evita-se o uso de tabelas para definir a configuração do diagrama a ser utilizado, ou seja, o número de anéis, o número de compartimentos por anel e os valores dos raios interno e externo, r_i e r_e , de cada anel do diagrama. A Figura 6.5 ilustra como seria o diagrama utilizado pelo método (compare com a Figura 5.2) e o texto a seguir descreve como é construído.

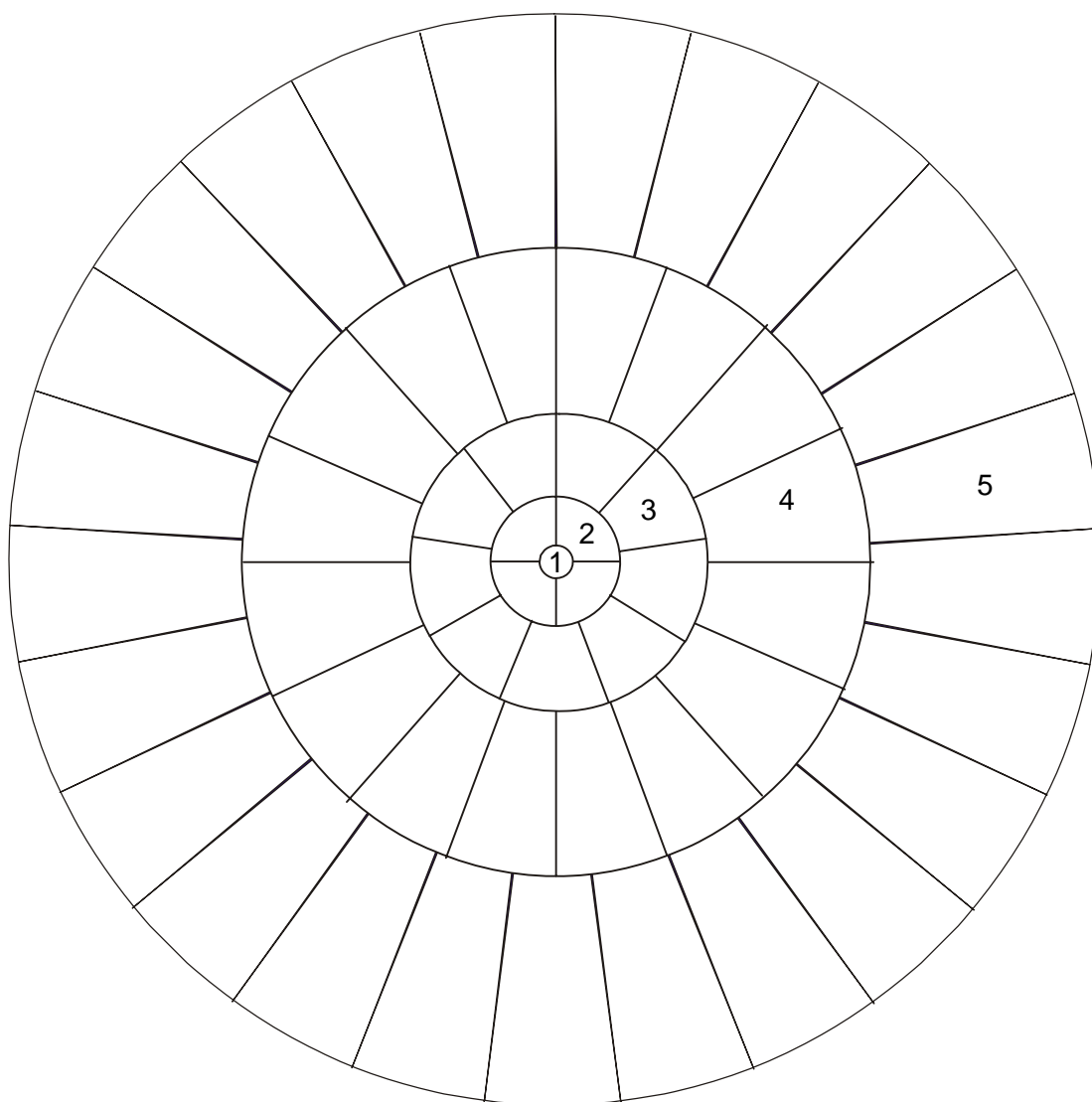


FIGURA 6.5: Formato aproximado do diagrama utilizado pelo método de correção digital de terreno criado. Os números denotam os anéis partindo do centro. Pode ser comparado com a Figura 5.2.

6.2.1.1 CONSTRUÇÃO DO DIAGRAMA

Os raios externos mínimo, $r_{e \text{ min}}$, e máximo, $r_{e \text{ max}}$, do primeiro e do último anéis, respectivamente, são definidos pelo usuário e podem ser de poucos metros a centenas de quilômetros. O raio interno mínimo é um valor infinitamente pequeno, positivo e diferente de zero, ou seja, não inclui a estação a ser corrigida. Já o raio interno máximo dependerá do valor do raio externo máximo.

O número de compartimentos ou segmentos, NC , para cada anel, A , de raios r_i e r_e é definido como

$$NC(A) = A^2 \quad (6.1)$$

onde $A = 1, 2, 3, \dots$

Os valores de r_i e r_e são obtidos de

$$\begin{aligned} r_i &= r_e(A-1) \\ r_e &= r_e(A-1) + NC(A) \cdot r_{e \text{ min}} \end{aligned} \quad (6.2)$$

sendo que $r_e(0) = 0,0$. As equações (6.2) são utilizadas até que $r_e \geq r_{e \text{ max}}$. Os pontos de altitude cujas coordenadas sejam coincidentes com r_e somente serão utilizados no anel com menores raios interno e externo, ou seja, o ponto P localizado em (x_p, y_p) só será usado se sua distância para a estação a ser corrigida, localizada em (x_0, y_0) , for $r_i < |x_p - x_0, y_p - y_0| \leq r_e$, onde $p = 1, 2, 3, \dots$. Por exemplo, se A for igual a 3 (o terceiro anel, A_3) e $r_{e \text{ min}}$ for 10,0 metros, NC será 9 [segundo a equação (6.1)] e o anel A_3 estará no intervalo $50 < A_3 \leq 140$ m, pois o anel A_2 está no intervalo $10 < A_2 \leq 50$ m e o anel A_1 está no intervalo $0,0 < A_1 \leq 10$ m, excluindo o ponto coincidente com a estação a ser corrigida.

A Tabela 6.1 é um exemplo para ilustrar o descrito.

TABELA 6.1: Exemplo de raios dos anéis e divisão em compartimentos para correção de terreno $r_{e \text{ min}} = 2$ metros para comparação com a TABELA 5.2.

Anel A	r_i (m)	r_e (m)	Compartimentos A^2
1	0*	2	1
2	2	10	4
3	10	28	9
4	28	60	16
5	60	110	25
6	110	182	36
7	182	280	49
8	280	408	64
9	408	570	81
10	570	770	100
11	770	1012	121
12	1012	1300	144
13	1300	1638	169
14	1638	2030	196
15	2030	2542	256
...

(*) deverá ser infinitamente pequeno e maior que zero.

Os lados de cada compartimento são definidos a partir de um ângulo de abertura, α , que dependerá do NC :

$$\alpha = 360 / NC \quad (6.3)$$

Esse ângulo é distribuído ao longo do anel, definindo cada compartimento. A distribuição sempre partirá do Norte. Os pontos de altitude que coincidirem com o lado esquerdo do compartimento quando se olha do centro do diagrama para fora serão excluídos. Por exemplo, se A for 4 (o quarto anel), NC será 16 e α será $22,5^\circ$, então o primeiro compartimento, C_1 , do anel 4 estará no intervalo $0,0^\circ < C_1 \leq 22,5^\circ$, o segundo compartimento, C_2 , estará no intervalo $22,5^\circ < C_2 \leq 45,0^\circ$, C_3 estará no intervalo $45,0^\circ < C_3 \leq 67,5^\circ$, e assim até C_{16} , que estará no intervalo $337,5^\circ < C_{16} \leq 360,0^\circ$.

Para que essas relações sejam utilizadas, é necessário que as coordenadas de cada ponto sejam transformadas em azimute e distância em relação à estação a ser corrigida.

6.2.1.2 A CORREÇÃO

A influência de cada compartimento no ponto em questão será dada pela equação (5.6) e a correção de terreno pela equação (5.7). Uma subrotina com o método é apresentada no Apêndice 2(B).

6.2.1.3 VANTAGENS E DESVANTAGENS

Dentre as vantagens desse método em relação aos métodos manuais como o de Hayford & Bowie (1912) ou o de Hammer (1939), além de ser digital, estão o fato de evitar o tedioso trabalho de montar o diagrama de setores, a maior precisão na determinação do z médio de cada compartimento, o fato de evitar o uso de tabelas de anéis e compartimentos. Quanto aos métodos digitais (Kane 1962; Plouff 1966), a maioria usa compartimentos quadrados de tamanhos iguais em um diagrama quadrado. Esse fato parece favorecer no tempo de processamento. Para levantamentos em áreas muito grandes e acidentadas, isso pode tornar o processamento lento, ainda mais se forem utilizadas equações multiquadráticas como em Krohn (1976) ou transformadas como em Parker (1995, 1996). O uso de compartimentos progressivamente maiores à medida que se afastam do ponto a ser corrigido e um diagrama circular parece diminuir esse problema. Todavia, a transformação das coordenadas em azimute e distância exige o uso de operações trigonométricas, o que certamente aumenta o tempo de processamento.

6.2.1.4 APLICAÇÃO NA ÁREA DE ESTUDO

A correção de terreno acima descrita foi aplicada ao LGCI utilizando modelo digital de terreno com densidade de quase 400 pontos / km^2 . Esses dados foram extraídos originalmente de folhas topográficas de diversas escalas por técnicos do Jet Propulsion Laboratory da NASA. A localização dos pontos coincide com o padrão de vôo de satélites em órbita aproximadamente polar estando espaçados em menos de um metro a 900 metros na direção de vôo e aproximadamente em 900 metros na direção perpendicular. Esses dados foram interpolados em malha regular com célula quadrada de 250 metros de lado, cobrindo a área de estudo (Figura-6.4) e mais 50 km além dos seus limites.

Inicialmente, foi utilizada uma densidade média de $2,67 \text{ g/cm}^3$ na correção de terreno dos dados gravimétricos [equação (5.7)]. Esse valor foi mudado assim que as diversas densidades foram estimadas.

6.2.2 ESTIMATIVA DE DENSIDADES

Na estimativa de densidades foram elaborados métodos de estimativa indireta, baseados em Nettleton (1939) e Parasnis (1972) (itens 5.2.2.3 e 5.2.2.4, respectivamente), além de estimativas em laboratório. Dados fornecidos pela WMC Mineração Ltda. também foram utilizados.

6.2.2.1 NETTLETON 2-D

Baseado em Nettleton (1939), o método consiste em determinar um valor de densidade que melhor se ajuste à relação distância *versus* anomalia Bouguer (Figura 5.4). Essa relação deve ser a mais horizontal possível.

Metodologia Os dados são separados em janelas com centro na estação gravimétrica pretendida (Figura 6.6). O tamanho inicial da janela é definido pelo usuário, que também define o número mínimo de pontos e, caso esse número seja insuficiente, o incremento no tamanho da janela.

Em cada janela é estimada a média das anomalias Bouguer para vários valores de densidade. Em seguida, são estimados os desvios dos valores de cada ponto em relação à média. O valor “ideal” de densidade é escolhido dentre aqueles que apresentam a menor soma dos desvios em valores absolutos. O processo é ilustrado na Figura 6.7, onde a distância é representada pelos eixos X e Y: o melhor resultado é aquele que mais se aproxima de um plano horizontal (anomalia Bouguer média) ou tenha a menor relação com a topografia.

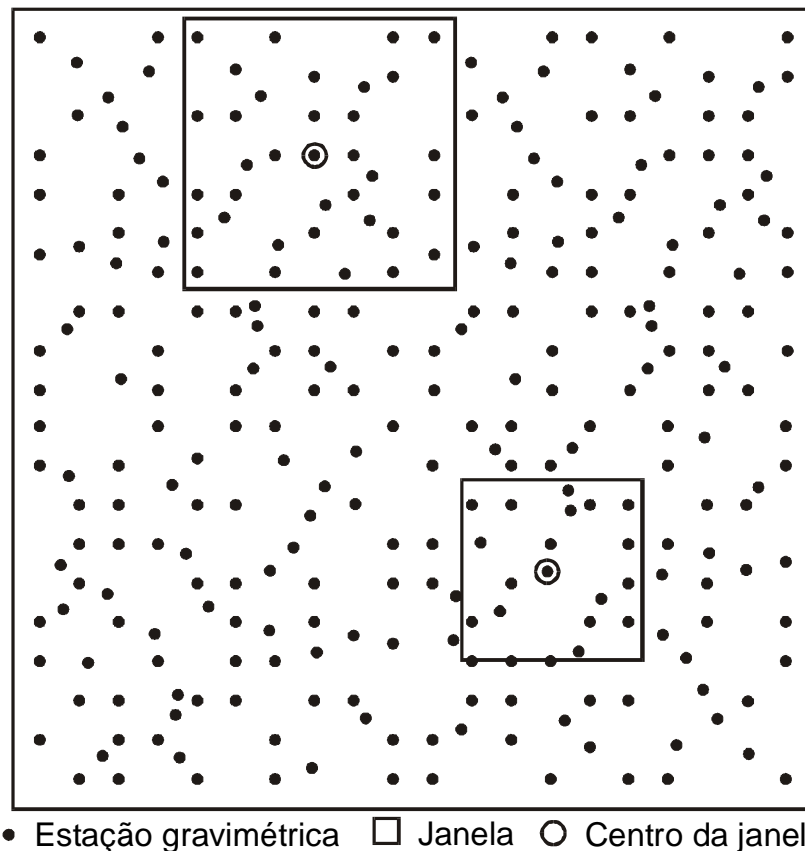


FIGURA 6.6: Representação pictórica da definição de janelas de dados sobre um levantamento gravimétrico qualquer. Cada estação estaria no centro de uma janela de tamanho pré-definido e ajustado até que uma condição de número mínimo de pontos seja atingida.

É bom lembrar que uma grande variedade geológica dentro de uma janela de dados, bem como a variação na distribuição dos pontos, pode comprometer o resultado.

Uma subrotina com o método é apresentada no Apêndice 2(D).

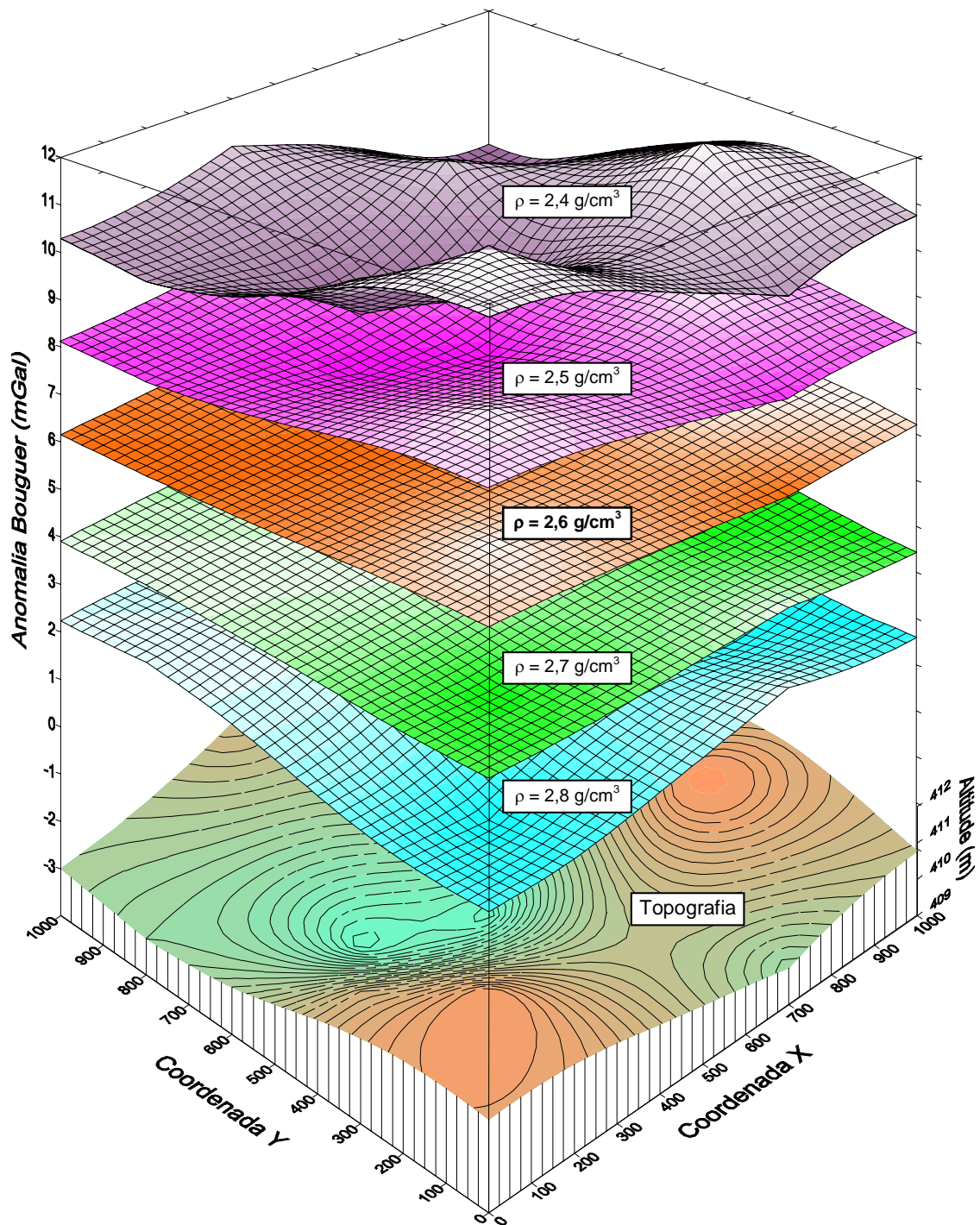


FIGURA 6.7: Representação pictórica do método Nettleton 2-D agindo em uma janela de dados. A melhor estimativa de densidade é representada pela superfície de anomalia Bouguer mais plana ($2,6 \text{ g/cm}^3$) e com pouca relação com a topografia da janela.

A Figura-6.8 e o Anexo II mostram os resultados para a área de estudo. A quantidade de pontos estimados (158) é bem menor do que a quantidade de estações gravimétricas (396 coletadas mais 132

da RGFB e de Marangoni *et al.* 1987). Alguns resultados não correspondem aos valores esperados para os tipos de rocha. O fato se deve à distribuição variável dos pontos e à insuficiência de dados em alguns casos.

6.2.2.2 PARASNIS AUTOMÁTICO

O método usa a mesma relação descrita em Parasnisi (1972). A diferença está na maneira em que é obtida: são usadas janelas de dados, com a estação em questão no centro (Figura 6.6), onde a relação da equação (5.11) é estimada aproximando-se uma reta por mínimos quadrados. Cada estimativa é testada de acordo com o desvio padrão dos resíduos em relação à reta estimada. Esse teste é realizado até que todos os pontos estejam inseridos no intervalo de mais ou menos três vezes o desvio padrão. O teste é feito para minimizar o efeito da variação geológica na janela.

O valor da densidade será a inclinação da reta que contiver os menores desvios.

Uma subrotina com o método é apresentada no Apêndice 2(F).

A Figura-6.9 e o Anexo III mostram os resultados para a área de estudo. A quantidade de pontos estimados (297) é menor do que a quantidade de estações gravimétricas (396 coletadas mais 132 da RGFB e de Marangoni *et al.* 1987). Alguns resultados não correspondem aos valores esperados para os diversos tipos de rocha. O fato se deve, como no método anterior, à distribuição variável dos pontos e à insuficiência de dados em alguns casos. Mesmo assim o método não é invalidado.

Comparando-se com o método anterior, os resultados muitas vezes não apresentam correspondentes ou são díspares. Por esse motivo, os resultados não foram utilizados como parâmetros para estimativas de anomalias Bouguer ou para inversões. Ambos os métodos não necessitam de aprimoramento à primeira vista, somente de um conjunto de dados mais uniforme.

6.2.2.3 MEDIÇÕES EM LABORATÓRIO

Foram coletadas 22 amostras de rochas na região. A maioria se concentra nas proximidades de Crixás e algumas em Guarinos e Itapaci. Essas amostras foram fragmentadas até o tamanho aproximado de 1 polegada cúbica (16,39 cm³ ou 16,39 ml).

Na estimativa das densidades foi utilizada uma balança de precisão (0,0001 g) do tipo AE163 da marca Mettler, um recipiente pequeno e com tampa e água desmineralizada.

Inicialmente, o recipiente foi totalmente preenchido com água desmineralizada, tampado e pesado. Esse processo se repetiu dez vezes para se ter o controle maior sobre o volume de água e, conseqüentemente, sobre o volume de água mais amostra. Esses volumes devem ser iguais para que se possa determinar o peso da amostra imersa em água, P_{ag} [equação (5.10)], pela subtração do peso do recipiente com água, do peso do recipiente com água mais a amostra. Por essa razão, o recipiente é totalmente preenchido.

Procedeu-se a pesagem das amostras (fragmentos). Realizou-se de três a vinte medições em cada tipo de rocha, determinando-se valores médios de densidade [equação (5.10)]. Os resultados são apresentados na Tabela 6.2, onde também são apresentadas as estimativas feitas pela WMC Mineração Ltda. para testemunhos do alvo Boa Vista nas proximidades de Crixás.

O objetivo das estimativas de densidade é o uso em inversões, além de estimativas de anomalias Bouguer.

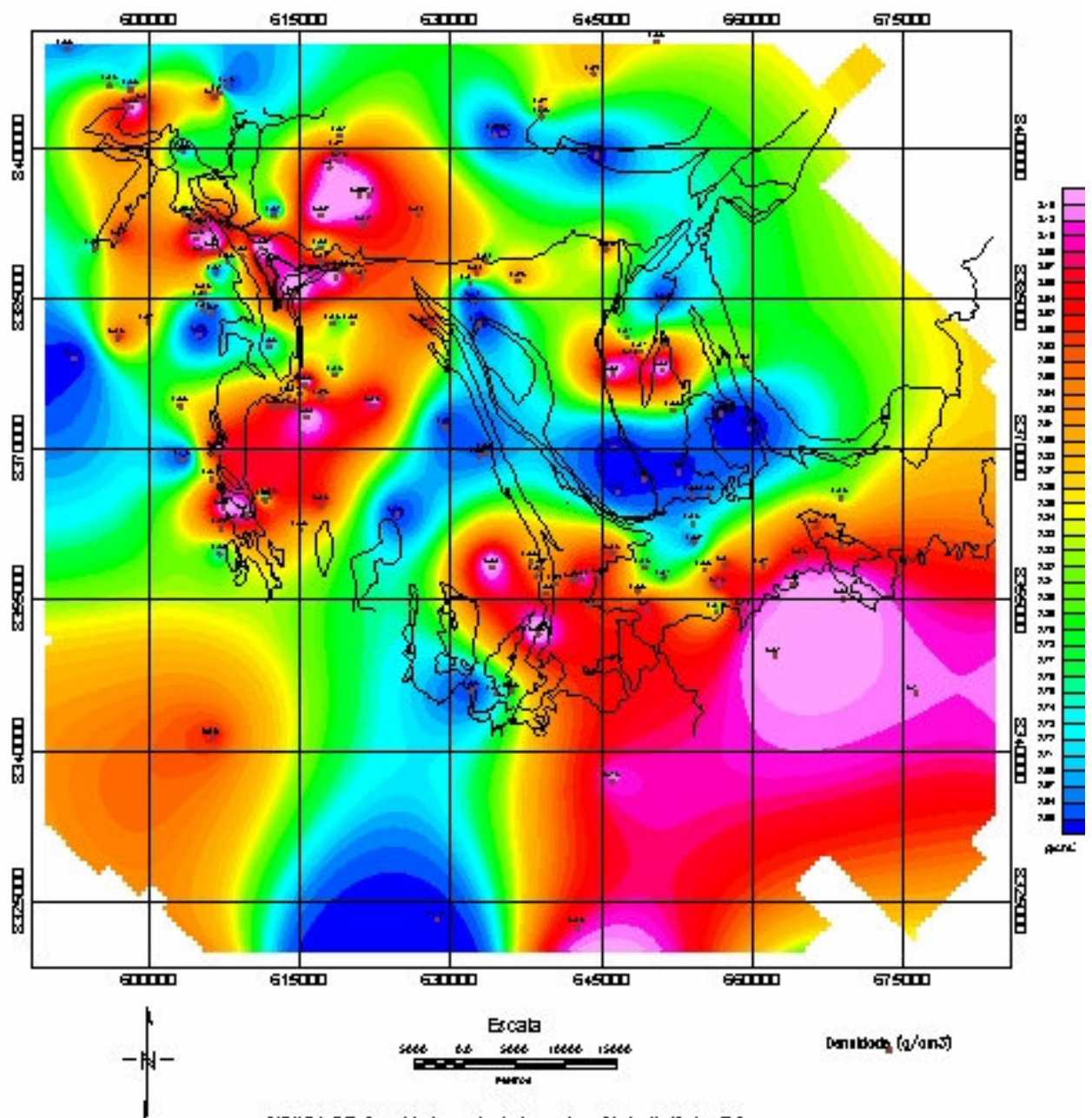


FIGURA 6.8: Densidades calculadas pelo método 2-D.

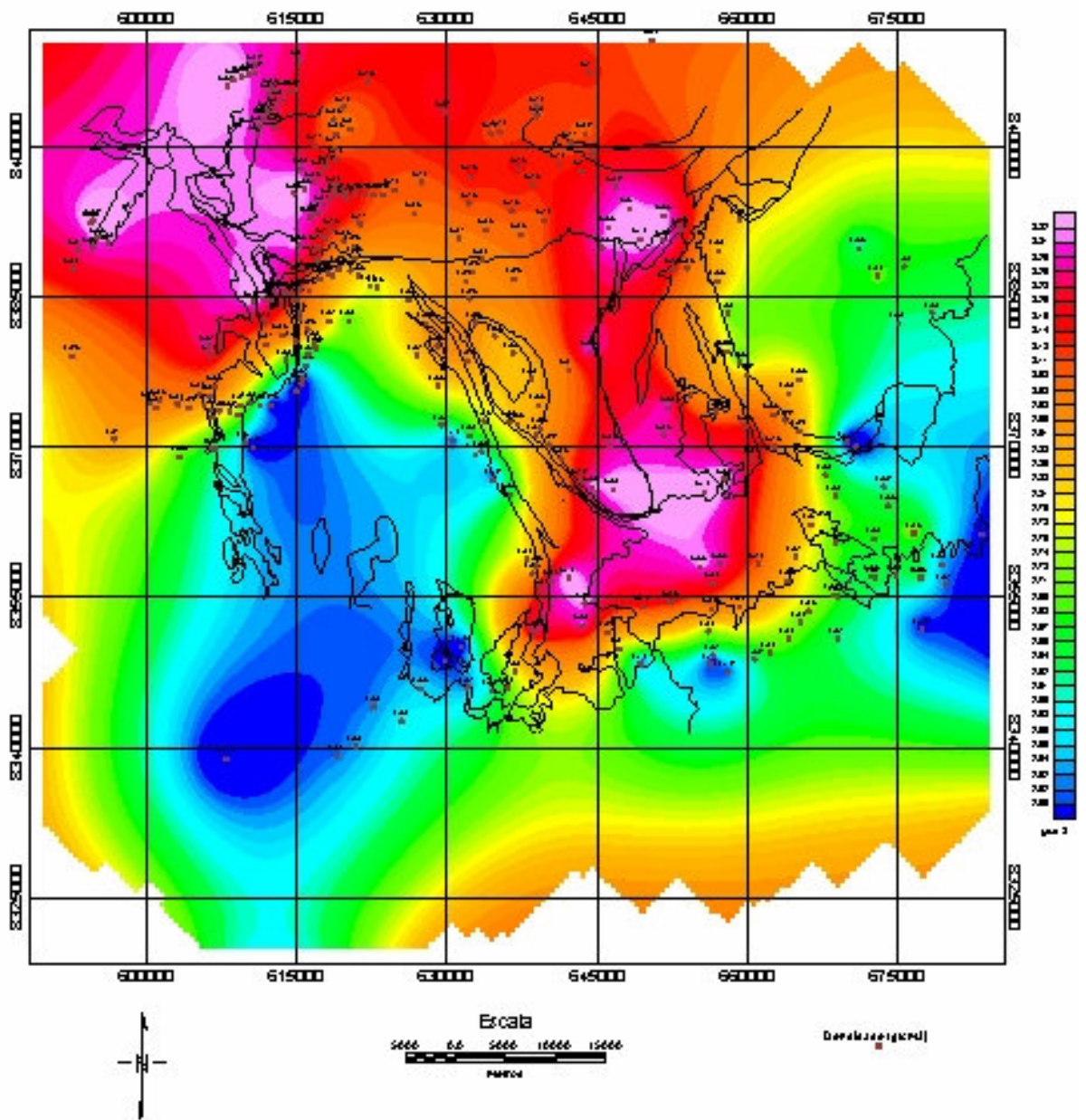


FIGURA 6.9: Localização e valores dos pontos com densidades calculadas pelo método Paramétrico Automático.

TABELA 6.2: Valores de densidades estimadas.

Rocha	Densidade, g/cm ³ (número de medições)
Diabásio (intrusão no C. Caiamar)	3,20 ± 0,08 (5)
Diorito	2,80 ± 0,05 (3)
Gabro (intrusão no C. Anta)	3,21 ± 0,16 (5)
Granodiorito (C. Anta)	2,66 ± 0,20 (15)
Metamáfica	3,09 ± 0,27 (13)
Metamáfica*	3,04 ± 0,16 (3)
Metaultramáfica	3,07 ± 0,34 (10)
Metaultramáfica*	3,05 ± 0,14 (19)
Serpentina - tremolita xisto**	2,85 ± 0,35 (3)
Sulfeto disseminado (metamáfica hospedeira)*	3,20 ± 0,29 (11); máx. 3,95
Tonalito (C. Anta)	2,67 ± 0,10 (5)
Tonalito (C. Caiamar)	2,66 ± 0,03 (5)
Veio de quartzo com sulfeto*	2,74 (2)

* Fonte: WMC Mineração Ltda. ** Incluída na estimativa de densidade das rochas metaultramáficas.

6.3 ANOMALIAS BOUGUER

As anomalias Bouguer foram estimadas segundo a equação (5.8), usando-se inicialmente uma densidade fixa de 2,67 g/cm³. Tanto as anomalias Bouguer, quanto as anomalias de Ar-livre estão listadas no Anexo IV.

A Figura-6.10 é o mapa de anomalias Bouguer da área do LGCI. Esse mapa revela um forte gradiente de sudeste para noroeste. Essa tendência foi diminuída com a retirada de uma superfície de grau dois resultando na imagem da Figura-6.11. Nessa figura observa-se claramente a presença dos três *greenstone belts* da região (Figura-6.2).

Para tornar essas anomalias menos influenciadas pela geologia, procedeu-se à alteração do valor de densidade. Essa alteração foi feita para aqueles pontos que estivessem contidos em rochas com estimativas de densidade em laboratório. Por conveniência, foi utilizada a média das principais unidades geológicas, por semelhança, seja pelo valor ou pelo tipo rochoso: 1) rochas máficas ou ultramáficas, 3,06 g/cm³; 2) rochas félsicas, 2,67 g/cm³; 3) filito carbonoso (unidades metavulcanossedimentares), 2,99 g/cm³; 4) diorito, 2,80 g/cm³; 5) gabro (intrusão no Complexo da Anta), 3,21 g/cm³. O resultado dessa operação, já reduzida a influência do forte gradiente SE/NW, é apresentado na Figura-6.12. Essa figura provavelmente mostra os valores “realmente” anômalos e revela uma forte tendência na direção SE/NW, aproximadamente paralela ao Corredor Transpressivo Ribeirão das Antas - Rio Vermelho (Queiroz & Blum 1997) e às ocorrências de ouro na região. Uma listagem dessas anomalias pode ser apreciada no Anexo IV, última coluna.

A Figura-6.13 é resultado da subtração da imagem da Figura-6.11 pela imagem da Figura-6.12. Essa imagem revela as principais unidades geológicas da região.

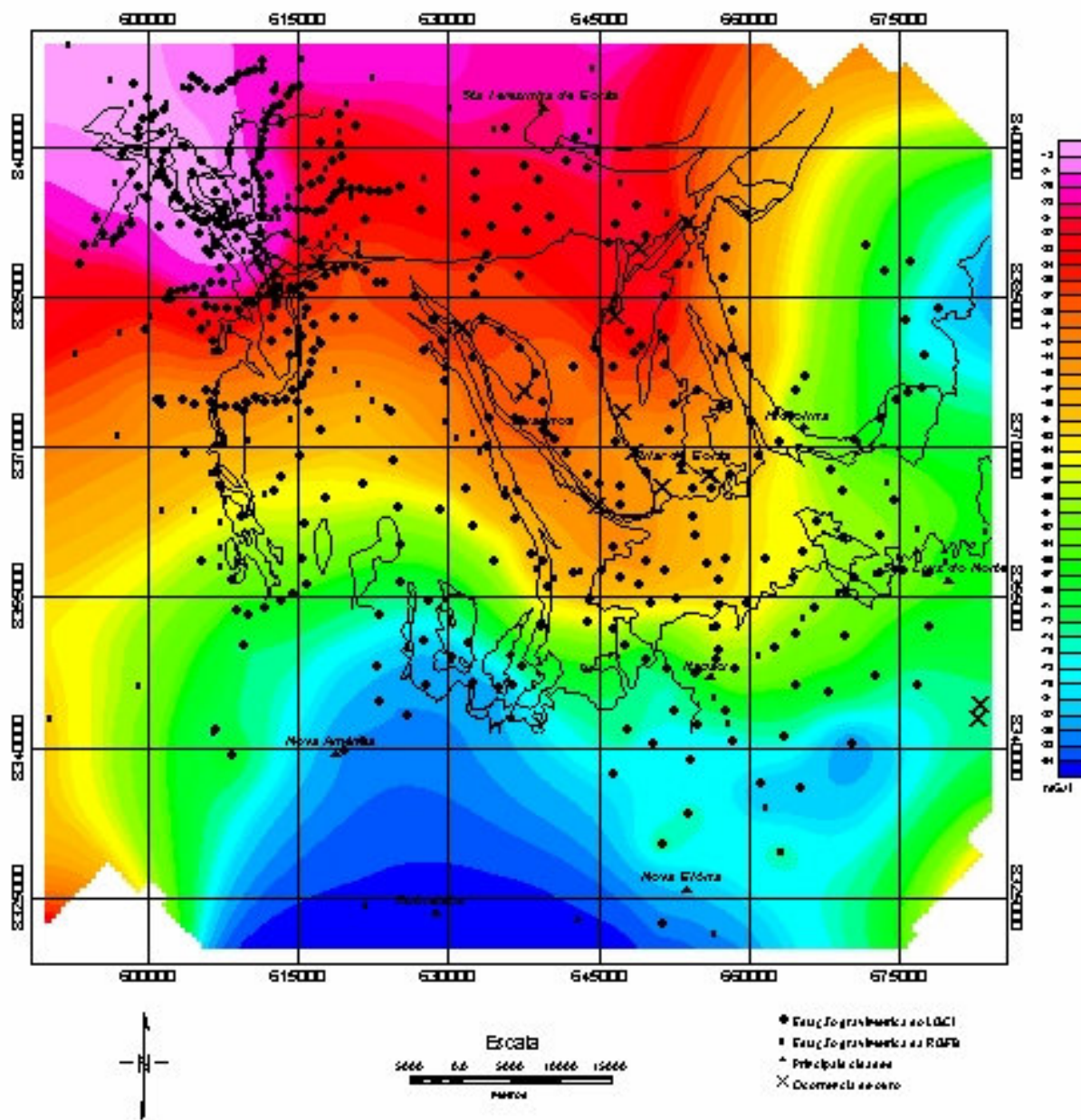


FIGURA 6.10: Mapa de anomalias Bouguer calculadas com densidade fixa (2,67 g/cm³).

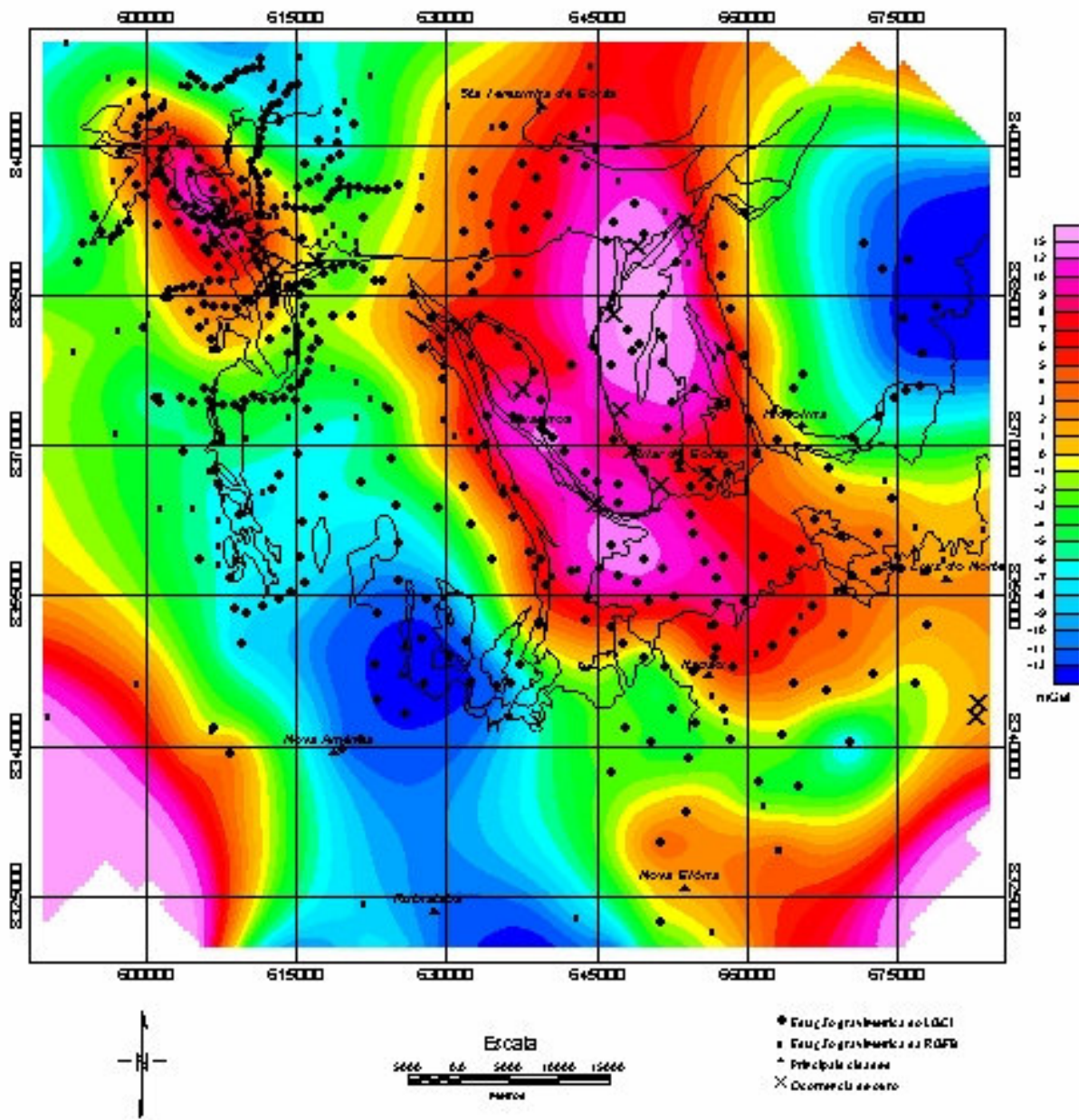


FIGURA 6.11: Mapa de anomalias Bouguer calculadas com densidade 1×10^3 ($2,67 \text{ g/cm}^3$) e referida superfície de latitude de grau 2.

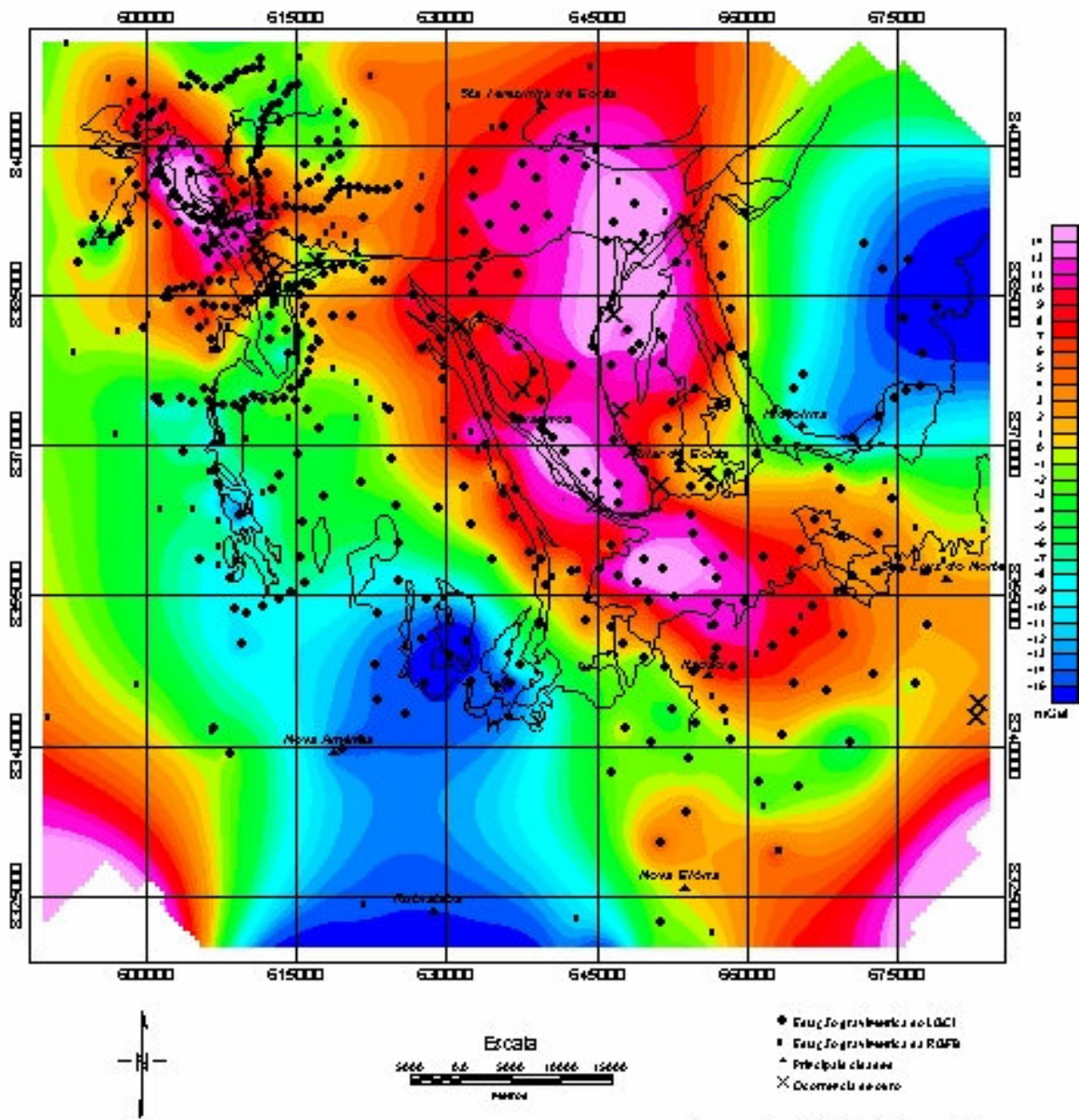


FIGURA 6.12: Mapa de anomalias Bouguer calculadas com densidade superficial e retificação superficial de ordem de grau 2.

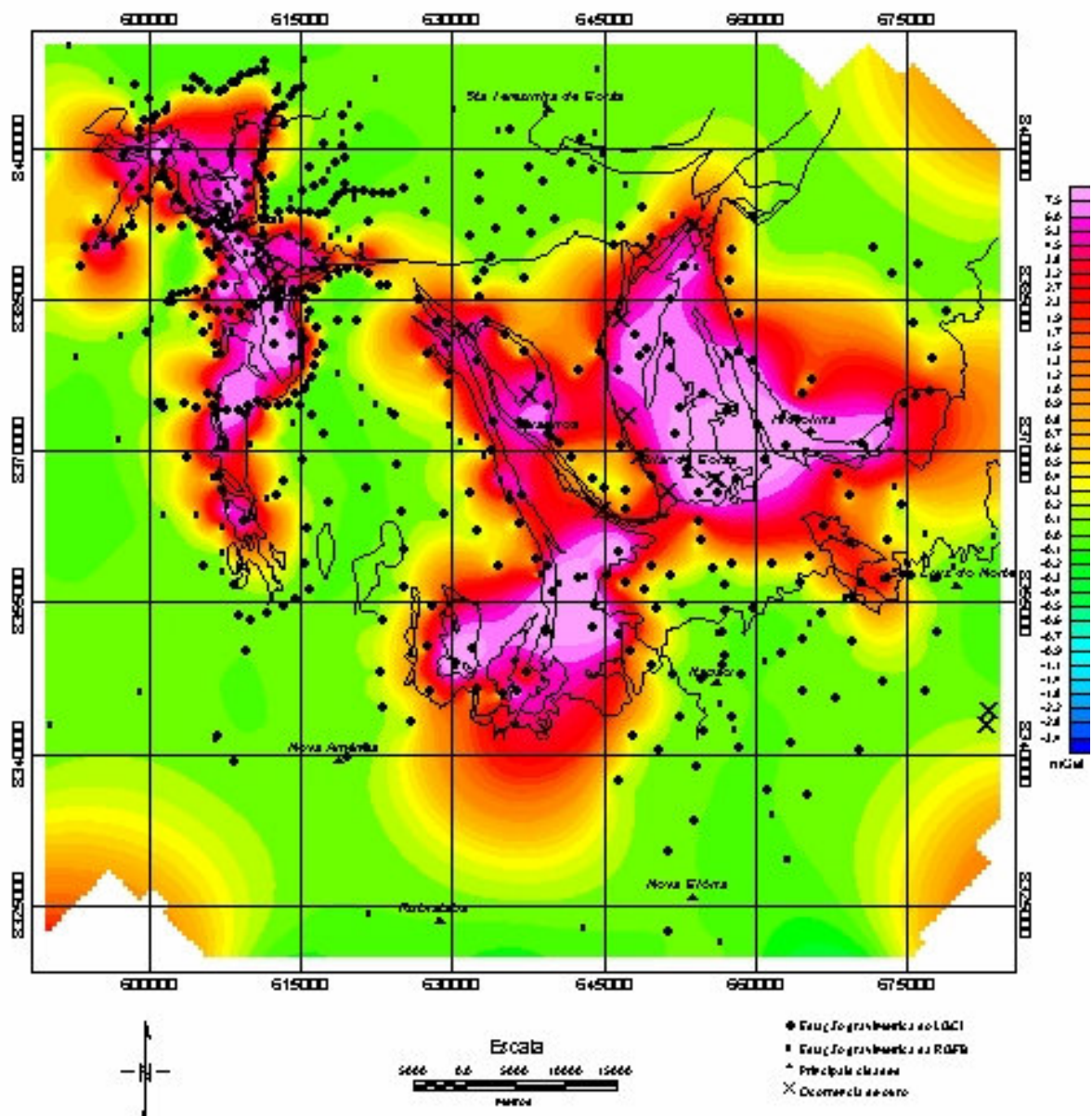


FIGURA 6.13: Mapa residual entre anomalias Bouguer com densidade fixa e densidade vertical.