

IDENTIFICAÇÃO DE ASSINATURAS GEOFÍSICAS DE AMBIENTES DE OCORRÊNCIA DE FORMAÇÕES FERRÍFERAS A PARTIR DA UTILIZAÇÃO DE ESTATÍSTICAS MULTIVARIADAS

Enos Nobuo Sato¹, Teodoro Isnard Ribeiro de Almeida¹,
Vilson Marques Dias² e Jorge Kazuo Yamamoto¹

Recebido em 4 março, 2011 / Aceito em 19 outubro, 2011
Received on March 4, 2011 / Accepted on October 19, 2011

ABSTRACT. The indication of geological environments with greater possibility of mineralization through indirect methods is necessary in the mining industry. In search of efficiency methods, often covering a wide range of variables in its implementation can make them geological and computationally complex and extravagant. The use of radiometric and magnetometric methods, in particular the combined use of total count with the analytic signal, can be an important alternative to infer the geological environments conducive to the occurrence of magnetite iron formations, especially in cases where the host rocks exhibit contrast to the mineralized rocks. Applying a principal components analysis (PCA) on magnetic and radiometric data in the study of iron mineralization at the region of Curral Novo do Piauí, Piauí State, we obtained a linear correlation of 0.99 between the first principal component and the radiometric total count channel. This concentration of information by reduction of the dimensionality shows that the PCA may explain, in a single component, a set of variables apparently independent, identifying the geological environment more conducive to the occurrence of iron formations.

Keywords: iron formations, gamma spectrometry, magnetometry, geophysics, principal components analysis.

RESUMO. A indicação de ambientes geológicos com maior possibilidade de ocorrência de mineralizações por meio de métodos indiretos é uma necessidade da indústria da mineração. Buscando eficiência, métodos abarcam uma grande gama de variáveis na sua execução, tornando-os complexos e extravagantes do ponto de vista geológico e computacional. A utilização em conjunto de métodos radiométricos e magnetométricos, principalmente a combinação dos resultados do canal da contagem total com o sinal analítico, pode ser uma importante alternativa para inferir ambientes geológicos propícios a ocorrências de formações ferríferas com magnetita, especialmente nos casos onde as rochas encaixantes apresentam contraste em relação às rochas mineralizadas. Aplicando uma análise por principais componentes (PCA) sobre dados radiométricos e magnetométricos no estudo das mineralizações ferríferas da região de Curral Novo do Piauí, PI, obteve-se uma correlação linear de 0,99 entre a primeira principal componente e o canal radiométrico da contagem total. Esta concentração de informação pela redução de dimensionalidade mostra que a PCA faz sua função ao explicar, em uma principal componente, um conjunto de variáveis, em princípio, independentes. Com isso pode-se identificar, naquele ambiente geológico, assinaturas particulares de zonas mais propícias à ocorrência de formações ferríferas com base nos dados de contagem total e do sinal analítico.

Palavras-chave: formações ferríferas, gamaespectrometria, magnetometria, geofísica, análise por principais componentes.

¹Instituto de Geociências – USP, Rua do Lago, 562, Cidade Universitária, 05508-080 São Paulo, SP, Brasil – E-mails: enos.sato@usp.br; talmeida@usp.br; jkyamamoto@usp.br

²BEMISA – Brasil Exploração Mineral S.A., Av. Rio Branco, 45, 4º andar, Centro, 20090-003 Rio de Janeiro, RJ, Brasil. Tel.: +55(21) 3550-1260; Fax: +55(21) 3550-1273 – E-mail: vdias@bemisa.com.br

INTRODUÇÃO

A utilização de técnicas de processamento digital de imagens obtidas a partir de dados geofísicos pode ser uma poderosa ferramenta de exploração mineral, quando processos de mineralização primários e secundários resultam na formação de anomalias nos canais gamaespectrométricos. Estudos realizados a partir de dados aerogamaespectrométricos podem trazer informações valiosas, que não estariam disponíveis nos métodos tradicionais de análise. A utilização de técnicas de estatísticas multivariadas, em especial a análise por principais componentes (PCA), podem possibilitar um melhor entendimento da geologia, principalmente quando apoiados em levantamentos geofísicos de semidetalhe.

Com base nesta proposição, os dados de gamaespectrometria e magnetometria dos depósitos de ferro da região de Curral Novo do Piauí, obtidos através de levantamento aéreo realizado pela Brasil Exploração Mineral S.A. – BEMISA foram reprocessados utilizando-se a análise por principais componentes, com o objetivo de delinear padrões geofísicos característicos, capazes de sugerir a ocorrência de mineralizações ferríferas na região.

Localizada na porção sudeste do estado do Piauí (PI), a área de estudo engloba os municípios de Curral Novo do Piauí e Simões na localidade denominada Massapê-Manga Velha (Fig. 1).

O Complexo Granjeiro, composto por rochas de caráter gnáissico migmatítico e rochas metavulcanossedimentares associadas forma o substrato rochoso da região. Não se conhece um quadro claro da geologia e da associação com os diversos tipos de mineralizações que lá ocorrem. Mapeamentos geológicos existentes para a região são apresentados em escalas 1:100.000 e são raros trabalhos de integração, envolvendo geologia e a resposta geofísica destas rochas. Em função da escala dos dados geológicos locais, foi feito o mapeamento geológico da área de estudo, com caminhamentos de direção SE-NW, medida de atitudes e coleta de amostras. A petrografia foi feita tanto em microscópios de luz transmitida como de luz refletida do Instituto de Geociências da Universidade de São Paulo.

A geofísica, em conjunto com técnicas de processamento digital de imagens para estudos relacionados às principais ocorrências minerais, poderá trazer um quadro mais preciso dos tipos de ocorrências minerais associados aos terrenos do Complexo Granjeiro e das regiões adjacentes, notadamente as ocorrências de formações ferríferas. Para os tipos de rochas que ocorrem na região, o uso de técnicas no tratamento de dados gamaespectrométricos permite identificar regiões anômalas nos canais U, Th, K e no campo magnético, permitindo assim à identificação de assinaturas características de ambientes geológicos propícios à

ocorrência de formações ferríferas e eventualmente a identificação de novas áreas com potencial prospectivo.

Levantamentos aerogeofísicos

A aeronave utilizada para a realização do levantamento foi uma Caravan Aircraft, e a instalação da instrumentação geofísica ficou a cargo da Microsurvey Aerogeofísica e Consultoria Científica Ltda.

O levantamento aerogeofísico foi realizado a partir de sobrevoo com altura nominal de 100 m e velocidade média de 280 km/h com linhas espaçadas de 300 m e 3000 m entre as *tie lines*, com amostragens no magnetômetro a cada 0,1 s e nos canais radiométricos a cada segundo. O sobrevoo com essas características possibilitou leituras do magnetômetro a cada 8-10 m sobre as linhas sobrevoadas. No total foram levantados 4291,55 km lineares em direção Norte-Sul com as *tie lines* com direção Leste-Oeste. Foi utilizado um magnetômetro Geometrics G-822A, com sensibilidade de 0,003 nT, no intervalo de 20.000 a 100.000 nT, e ruído no sensor menor que 0,02 nT. Os dados coletados pelo magnetômetro tiveram a correção de *lag*, variação diurna, nivelamento, micronivelados e posteriormente corrigidos pelo IGRF (*International Geomagnetic Reference Field*) a partir do modelo IGRF 2005 recalculado para a data do levantamento (Microsurvey, 2009).

O espectrômetro RSX 500, com captação dos sinais radiométricos em 1024 canais. Nos dados radiométricos foram realizadas correções de *lag*, correção de tempo morto, processos de filtragem, remoção de voo e *background* cósmico, remoção de *background* de radônio e estimativa do coeficiente *skyshine*, remoção do efeito Compton, correção de altitude e posteriormente foram convertidos em concentração de radioelementos e micronivelados (Microsurvey, 2009). O sobrevoo foi entregue em projeção UTM local na zona 24 Sul, com *datum* SAD 69 e elipsoide de referência GRS 1967 e em função da resolução do levantamento a escala dos trabalhos é de 1:30.000.

Geologia Regional

A área de estudo está inserida no contexto geológico da Zona Transversal Província Borborema, que equivale à Região de Dobramentos Nordeste (Brito Neves, 1975). Constitui um domínio de intensa complexidade litoestrutural e de longa história crustal, onde são evidentes os efeitos dos eventos tectônicos, termais e magmáticos do Ciclo Brasileiro, e sua evolução policíclica (Santos & Brito Neves, 1984). Alcançam maiores expressões na Província os terrenos pré-cambrianos, em especial: o embasamento retrabalhado nos eventos Transamazônico

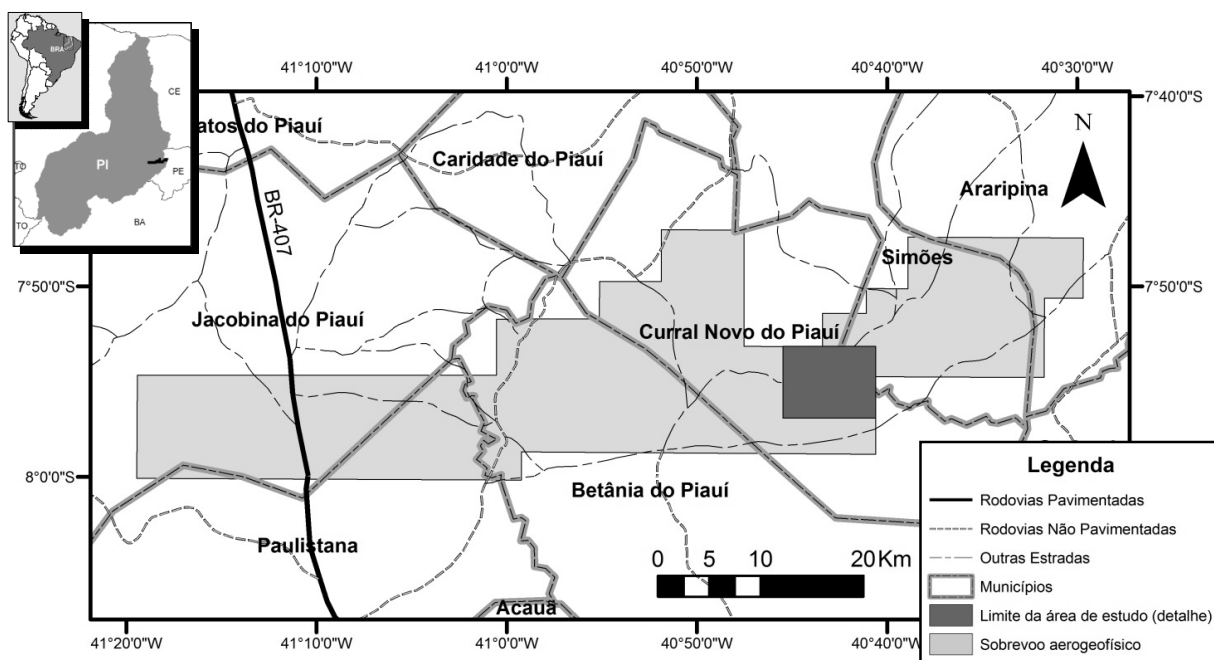


Figura 1 – Mapa de localização da área de estudo localidade de Massapê-Manga Velha (área de trabalho).

e Brasileiro; as supracrustais do proterozoico e ocorrências de suítes graníticas neoproterozoicas além da cobertura sedimentar do fanerozoico (Ribeiro & Vasconcelos, 1991). O domínio mais antigo, de idade arqueana, é formado por rochas do Complexo Gnaissico-Migmatítico e rochas plutônicas associadas, articulando com associações tonalito-trondhjemito-granodioritos (TTG) e supracrustais metavulcanossedimentares o denominado Complexo Granjeiro (Bizzi et al., 2001). No que diz respeito à geocronologia, os dados disponíveis permitem o seu enquadramento no neoarqueano a paleoproterozoico (Brito Neves et al., 1982). As supracrustais compreendem os metapelitos e metapsamitos, com considerável contribuição vulcânica, do Grupo Cachoeirinha. Esta unidade é considerada de idade mesoproterozoica por correlação com outras supracrustais da região. Um expressivo conjunto de granitoides neoproterozoicos de combinação variável entre granodioritos, monzonitos, quartzio-sieno granitos e álcali-sieno granitos completam o arcabouço pré-cambriano da região. As coberturas sedimentares fanerozoicas são representadas por sedimentos cretácicos da Bacia do Araripe, das formações Santana, caracterizada pela associação de fácies siliciclásticas, evaporíticas e carbonáticas, e Exu, formada essencialmente por arenitos.

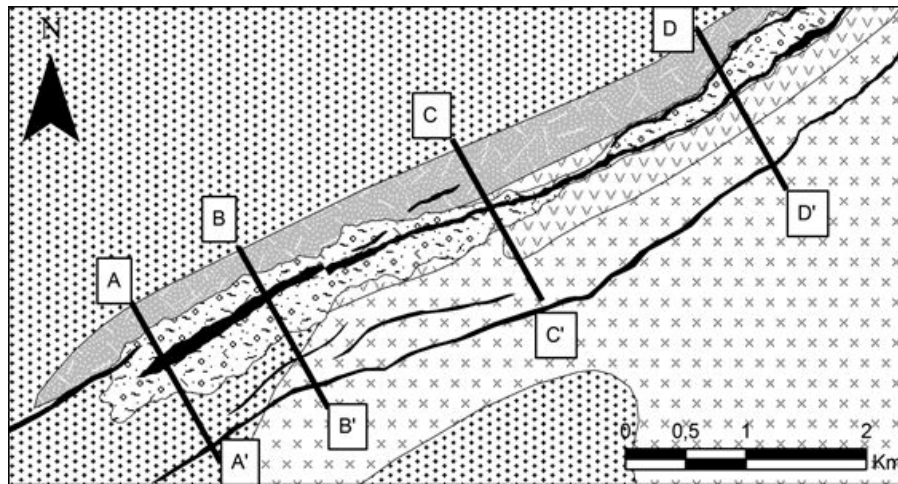
As formações ferríferas da localidade denominada Massapê-Manga Velha e demais ocorrências de ferro cadastradas mostram, como traço comum, associação com componentes líticos

do Complexo Granjeiro. De acordo com Santos (1996), o Complexo Granjeiro encerra duas associações litoestratigráficas diacrônicas, com o seguinte arranjo e particularidades: um conjunto mais antigo de rochas supracrustais, composto por metamáficas anfibolitizadas, tufo máficos e félsicos xistificados, metacherts, formações ferríferas, paragneisses, calcissilicáticas, quartzitos e xistos paraderivados; presença de componentes vulcanossedimentares e inclusão de horizontes químico-exalativos apontando para processos desenvolvidos em ambiente de crosta oceânica e uma unidade constituída por ortogneisses granodioríticos a tonalíticos com idade U-Pb SHRIMP 2,54 Ga (Silva et al., 1997) com evidências de intrusão e/ou assimilação das supracrustais, atestando o caráter plutônico desses ortogneisses.

Estas interpretações relacionadas às supracrustais e aos ortogneisses, combinadas com idades modelo em relação ao reservatório mantélico empobrecido (TDM) obtidas nestas rochas no intervalo 2,65-2,55 Ga, sugerem que o Complexo Granjeiro representa um remanescente arqueano de um sistema do tipo bacia oceânica-arco magmático.

Geologia Local

A geologia da área de estudo está inserida no contexto do Complexo Granjeiro que pode ser subdividido em dois domínios litológicos principais: a sucessão vulcanossedimentar e os domí-



Legenda

Litologias

- Depósito Elúvio Coluvionares
- Formações Ferríferas
- Quartzito Ferrífero
- Rochas Metabásicas
- Biotita Ortognaisse de composição granítica a tonalítica, cinza a cinza claro, migmatizado
- Anfibolito fortemente boudinados e restos de supracrustais não individualizados
- PERFIS AMOSTRADOS

Figura 2 – Mapa geológico da área de estudo com localização dos perfis amostrados.

nios dos granitoides TTG, os quais representam as rochas mais antigas da região (Fig. 2).

De maneira geral, as formações ferríferas são compostas por bandadas mistas. As formações ferríferas da localidade Maspê-Manga Velha são em geral laminadas a xistosas, com biotita (bt)-granada (grt)-hornblenda (hbl)-cummingtonita (cum) xistos com magnetita, hbl-cum xistos e bt-hbl-cum xistos. Tem coloração cinza escuro esverdeado a negro e esbranquiçado quando há presença de carbonatos. Apresentam granulação fina a muito fina, ocasionalmente com porfiroblastos centimétricos de sulfetos, granadas e magnetita. O bandamento composicional está preservado na maioria das vezes. A textura geral dessas rochas é porfiroblástica com matriz lepidonematoblástica a granonematoblástica. Os porfiroblastos são constituídos de cristais idióblásticos de magnetita, às vezes pirita e calcopirita bem formados, com tamanhos variando de 0,5 a 1,0 cm. Na maioria dos casos, tais porfiroblastos são tardios. O bandamento dessas rochas é marcado pela alternância de níveis quartzosos e níveis ricos em silicatos de ferro, em sua maioria anfibólios (hornblenda,

cummingtonita e actinolita), e raros níveis ricos em magnetita. A mineralogia desta rocha é essencialmente formada por anfibólios, magnetita, biotita e quartzo. Como acessórios ocorrem feldspato, granada, clorita, zircão, apatita, magnetita, pirrotita e calcopirita. Tem como característica marcante o alto conteúdo de magnetita, geralmente superior a 20%. Apresentam bandamento composicional, marcado pela alternância de níveis milimétricos de cor clara, ricos em quartzo e níveis ricos em óxidos e silicatos de ferro de coloração cinza a verde. O óxido de ferro encontrado nessas rochas é a magnetita, ocorrendo na forma de grãos idióblásticos com até 1 mm e na forma de grãos xenoblásticos muito finos. A textura geral é granoblástica a nematogranoblástica com níveis de textura porfiroblástica com matriz granoblástica a nematogranoblástica. Essas rochas apresentam conteúdo de Fe da ordem de 30 a 40%, sendo o principal litotipo de interesse econômico da área estudada.

As rochas encaixantes são constituídas por rochas metabásicas com variações intermediárias a partir de dois litotipos principais: grt-bt-hbl anfibolitos, grt-bt-cum anfibolitos. A tex-

tura dessas rochas varia entre termos granonematoblásticos, lepidonematoblásticos e nematoblásticos. A foliação é marcada pela isorientação de cristais de anfibólio, alongados paralelamente segundo a direção do traço da estrutura. Também constituem rochas encaixantes granitoides de composição monzonítica a sienogranítica, com relações de contato não determinadas. É possível que estas rochas representem intrusões tardias deformadas e paralelizadas durante o último evento metamórfico-deformacional. Outra possibilidade é que representem fases finais dos processos de multi-intrusões relacionados às associações TTG.

Análise por principais componentes

A análise por principais componentes (PCA) é um método que pode auxiliar na identificação de padrões em uma base de dados com múltiplas variáveis. Particularmente, esse método demonstra se as variáveis podem ser genericamente ou integralmente explicadas em termos de um número menor de fatores denominadas principais componentes (PCs). É uma abordagem estatístico-matemática que pode ser usada para analisar inter-relações entre um grande número de variáveis e explicar essas variáveis em

termos de dimensões inerentes (fatores/principais componentes) (Hair et al., 2005) e verificar se as variáveis podem ser genérica ou inteiramente explicadas em termos de um número menor de variáveis denominadas fatores.

As PCs são, segundo Davis (1986), os autovetores de uma matriz de correlação, e fornecem informações sobre a estrutura da matriz. Uma síntese dos processos envolvidos nos trabalhos com análise por principais componentes é apresentada na Figura 3.

Em exploração mineral, esse método multivariado de análise é usado na caracterização e mapeamento das inter-relações entre um grande número de dados (e.g. geoquímica de superfície). Grandes volumes de dados são um problema crescente, tendo em vista o acúmulo de informações nos bancos de dados com grande número de variáveis. Com o objetivo de simplificar o processamento e análise de grandes conjuntos de dados, houve um renovado interesse nas técnicas de análises via principais componentes e sua respectiva forma de apresentação (Geosoft, 2008).

Davis (1986) apresenta exemplos a partir da utilização de matrizes de correlação (modo Q) e variância-covariância (modo R), com a utilização dos modos Q ou R e Q e R simultaneamente.

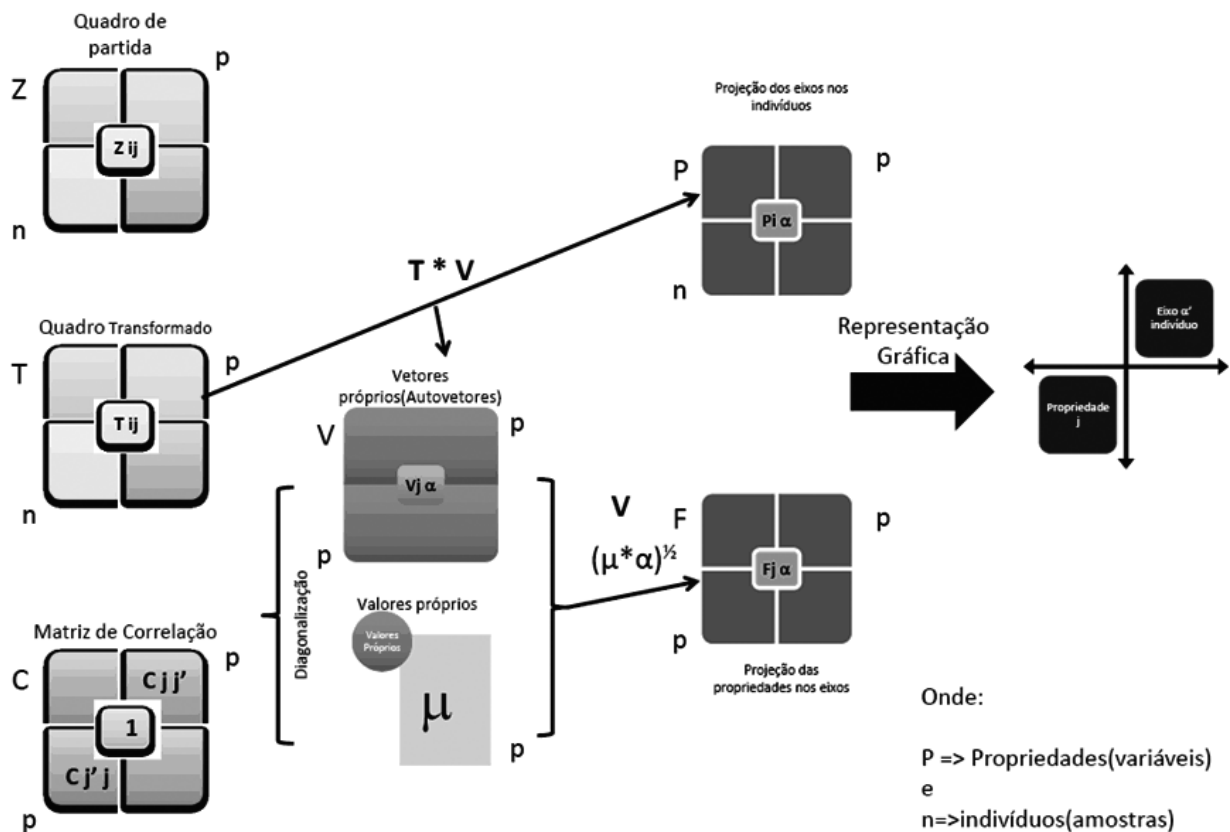


Figura 3 – Síntese do algoritmo de análise por principais componentes e fluxo do processamento dos dados na utilização da PCA.

Compara metodologias ressaltando que a utilização de um ou outro modo (Q e R) produz resultados diferentes na avaliação de um conjunto de dados, pois a variabilidade avaliada no modo Q é a variabilidade entre amostras enquanto a variabilidade avaliada pelo modo R é a variabilidade entre variáveis. De forma sintética, o modo R examina as correlações ou covariâncias entre as variáveis, enquanto o modo Q tem seu foco nas correlações ou covariâncias entre amostras. Como a matriz $[M]$ originada no modo R não é idêntica à matriz $[M]$ do modo Q , a diferença entre escalas não fornece os mesmos resultados apesar de serem equivalentes, fato que segundo Davis (1986) escapa à maioria dos investigadores. O modo R foi desenvolvido levando à criação de procedimentos extremamente pesados e computacionalmente extravagantes. Na análise por principais componentes pelo modo Q a normalização dos dados e sua divisão por cada elemento de $[X]$ pela raiz quadrada da soma dos quadrados das linhas, também produz a matriz escalar $[W]$. No modo R a solução fatorial se dá pela matriz simétrica dos menores produtos $[W]'[W]$, enquanto no " Q mode" a solução inicia-se pela matriz simétrica dos maiores produtos $[W][W]'$ (Davis, 1986). Isso significa também que os procedimentos de escalonamento de valores não são os mesmos para originar $[W]$ a partir dos dados originais $[X]$. Por exemplo, na análise das principais componentes, cada elemento de $[X]$ é dividido pelo desvio-padrão das colunas para produzir $[W]$.

O problema a ser solucionado pelo método das principais componentes visa encontrar o sistema de eixos que melhor se ajusta à nuvem de pontos, permitindo diminuir a dimensionalidade do espaço de atributos com perda mínima de informação. Genericamente a análise por principais componentes envolve a transformação de cada elemento de uma matriz $[X]$ pela divisão do desvio-padrão das colunas, produzindo uma matriz escalar $[W]$. E compreende uma série de procedimentos estatísticos iniciados a partir da transformação de uma matriz inicial de dados em uma matriz de dados normalizados de amostras nas linhas e as variáveis descritas nas colunas da respectiva matriz. A partir da matriz de dados transformados gera-se uma matriz de correlação entre as variáveis normalizadas, a qual servirá de base para derivar dos autovetores e autovalores que irão descrever as principais propriedades das variáveis. O processo de cálculo das principais componentes envolve a resolução de sistemas de equações lineares para a obtenção dos autovalores e autovetores.

Os autovalores são números reais associados aos autovetores e representam a magnitude ou o comprimento dos eixos das principais componentes (Davis, 1986). Segundo esse autor, a conversão da matriz de dados normalizados, ou unidades auto-

vetores, em PCs não afeta a direção dos vetores, ou seus comprimentos. Isto é feito pela multiplicação de cada elemento numa matriz normalizada pelo valor correspondente ou raiz quadrada do autovalor correspondente. A principal componente resultante é um valor que é ponderado proporcionalmente pela correlação que ele representa, em relação às variáveis.

Os procedimentos para obtenção das principais componentes envolvem a multiplicação de uma matriz, à esquerda de um vetor, e trará como resposta um vetor que é transformado da sua posição original. É da natureza da transformação que os autovetores apareçam. Sugere que ao encontrar autovetores os mesmos devem ter comprimento unitário, procedimento este que é a razão da normalização do conjunto de dados. Outra razão apresentada é em relação ao comprimento de um vetor que não será afetado se for realmente um autovetor enquanto a direção irá afetar as propriedades do autovetor. Assim, a fim de manter autovetores com um padrão, e sempre que encontrar um autovetor é prática escaloná-lo para o comprimento unitário.

O estudo das PCs se inicia a partir da definição do critério do autovalor, através do Teste de *Scree*, que indica que qualquer componente individual analisada deverá explicar ao menos uma variável e apenas as componentes que possuem autovalores maiores que 1 são consideradas significantes.

O Teste de *Scree* é realizado com o objetivo de identificar o número de componentes que podem ser extraídos antes que um valor único de variância comece a dominar a estrutura comum (Hair et al., 2005). O Teste de *Scree* é determinado a partir do gráfico de autovalores em relação ao número de componentes em sua ordem de extração. A forma da curva resultante é utilizada para avaliar o ponto de corte. A seleção do número de componentes é inter-relacionada com uma avaliação da estrutura, a qual é revelada na fase de interpretação. Se poucas componentes são selecionadas, a estrutura correta não é revelada e dimensões podem vir a serem omitidas. O ponto no qual o gráfico começa a ficar horizontal é indicativo do número máximo de fatores a serem extraídos.

Os autovalores e, conseqüentemente, as componentes, representam a proporção da variância total explicada pelo respectivo autovetor e cada carga fatorial é proporcional à raiz quadrada do valor de variância atribuída pela respectiva variável ao fator.

MATERIAIS E MÉTODOS

Para o início dos trabalhos foram compiladas as folhas geológicas da CPRM denominadas Patos (Scheid & Ferreira, 1991), Simões (Ribeiro & Vasconcelos, 1991), Santa Filomena (Angelim, 1988), Paulistana (Gomes & Vasconcelos, 1991) e Afrânio (Sampaio,

1991), originalmente em escala 1:100.000. Estes arquivos originalmente em papel foram escaneados, digitalizados em formato *shapefile* e posteriormente integrados em banco de dados compondo a base geológica utilizada durante os trabalhos. As cartas compiladas em escala 1:100.000 e seus respectivos bancos de dados serviram para o balizamento dos estudos dos padrões gamaespectrométricos por unidades geológicas. Os dados utilizados neste estudo foram analisados separadamente, de modo que os de gamaespectrometria foram tratados de forma independente, via PCA, dos dados aeromagnéticos, também levantados no sobrevoo aerogeofísico na área de estudo.

Os dados utilizados correspondem a um banco de dados aeromagnéticos e aerogamaespectrométricos de levantamento realizado para o projeto da BEMISA denominado Planalto Piauí, sobre os municípios de Simões, Curral Novo do Piauí, Araripina e Betânia do Piauí, em levantamento complementado em Janeiro de 2009 (Microsurvey, 2009).

Os dados de aeromagnetometria foram utilizados para comparação com os resultados oriundos dos dados radiométricos e correlacionados com a geologia, buscando um prognóstico de possíveis anomalias relacionadas a mineralizações na área.

Dados do mapeamento geológico exploratório foram utilizados visando guiar a caracterização das assinaturas geofísicas de modo que a ambiência geológica de ocorrência das formações ferríferas pudesse ser determinada a partir do cruzamento da contagem total e do sinal analítico. Dados de sondagens, de descrição de rochas e petrografia prestaram apoio na correlação dos sinais com os tipos de rochas encontrados em subsuperfície. Desta forma, a partir da caracterização das rochas em superfície e subsuperfície foi possível determinar a assinatura geofísica das formações ferríferas em termos dos métodos radiométricos (contagem total) e magnetométricos (sinal analítico) (Fig. 4).

RESULTADOS E DISCUSSÃO

Trabalhos de mapeamento geológico de cunho exploratório executado pela BEMISA apresentaram como resultado a delimitação de 46 corpos mineralizados em ferro, arrançados ao longo de expressiva zona de cisalhamento de caráter dextral, sintética com *trend* 60°N, entre as localidades de Serra Vermelha, a sudoeste e Monte Santo a nordeste da região (Dias, 2008). Trabalhos geológicos de detalhe integrados com levantamento magnético aéreo consolidaram, na área objeto deste trabalho, três segmentos ou depósitos de maior importância entre as localidades do Massapê e Manga Velha. Apesar do contexto sub-regional composto predominantemente por rochas de composição ácida (gnaisse graníticos e sienogranitos) os corpos de formação ferrífera dis-

tribuídos, estão encaixados ou associados a rochas metabásicas anfibolitizadas e biotitizadas, pelo efeito de metamorfismo, articuladas com domínios ácidos de amplo espectro territorial. Portanto, é previsível um forte contraste de propriedades magnéticas e radiométricas traduzidas no levantamento geofísico utilizado neste trabalho.

Rochas básicas e rochas ácidas apresentam comportamento oposto e bem distinto quando analisados os canais radiométricos (U, Th ou K) e mesmo o canal da contagem total, permitindo identificar e distinguir domínios litológicos de rochas ácidas de domínios com predomínio de rochas básicas. Isto se deve ao fato das rochas ácidas normalmente conterem maior quantidade de minerais portadores de elementos radioativos em relação a rochas básicas. Considerando que as encaixantes imediatas das mineralizações são rochas básicas, o método foi utilizado para delimitação dos ambientes geológicos com a presença de rochas metabásicas. Isto associado a zonas com altos valores do sinal analítico possibilitou delinear o limiar das ambiências geológicas com maior propensão à ocorrência de formações ferríferas à magnetita.

Basicamente foram aplicados conhecimentos das propriedades físicas das rochas (susceptibilidade magnética e propriedades radiométricas) para delimitação das ambiências de maior favorabilidade a partir do estudo dos canais radiométricos e das transformadas do campo magnético total. Sobre as premissas iniciais de que (a) rochas básicas proporcionam baixos tanto no canal da contagem total como na primeira principal componente da PCA sobre as variáveis originais (K, eTh e eU); (b) rochas ácidas formam altos nos canais radiométricos e (c) que as rochas de maior susceptibilidade magnética transmitem um fluxo maior de energia eletromagnética que rochas de menor susceptibilidade magnética, foi desenhada a estratégia para a confecção dos perfis.

Assim, a partir da sobreposição dos perfis da anomalia do sinal analítico e da contagem total foi possível a delimitação dos limiares das ambiências geológicas mais favoráveis à ocorrência de formações ferríferas.

A conjugação das duas variáveis com a geologia pode ser observada na Figura 5.

Em relação à aplicação de PCA, os estudos foram realizados visando identificar a PC que concentraria a maior quantidade de informação, verificando-se posteriormente suas cargas para identificação das variáveis que atuavam nos dados conferindo maior peso relativo em cada uma das componentes. Com base neste critério é possível afirmar que apenas a primeira principal componente, por apresentar valores maiores que 1, explica o conjunto das quatro variáveis (Fig. 6).

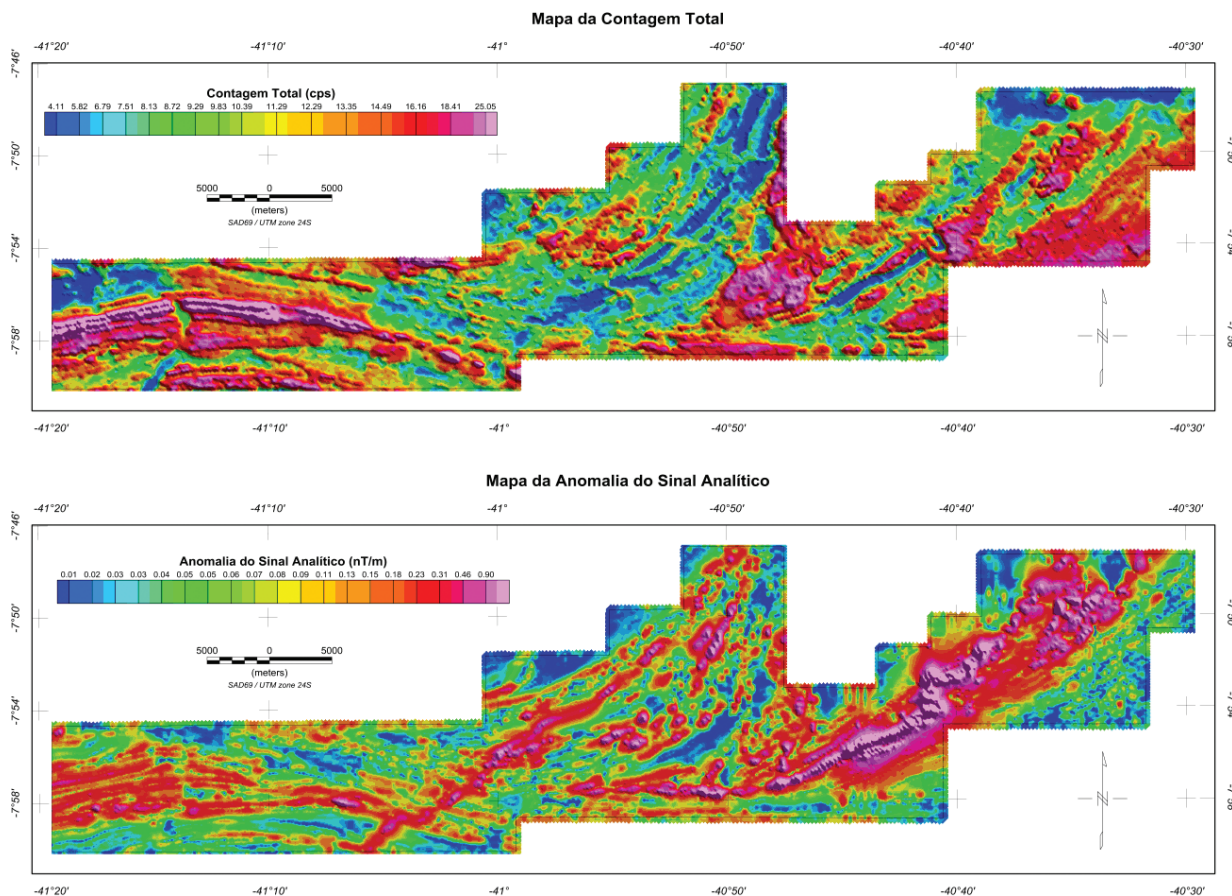


Figura 4 – Mapas da contagem total, em contagem por segundo (acima), e do sinal analítico, em nT/m, variáveis originais a partir das quais foi realizado parte dos trabalhos.

A primeira PC teve da variável contagem total sua principal carga (0,99) e, secundariamente, das variáveis tório e urânio, com valores muito próximos, 0,906 e 0,899, respectivamente, e também apresentou coeficiente de correlação linear de 0,99, para um nível de confiança de 95%, com a variável contagem total e conseguiu delimitar, da mesma forma que aquela variável, o contraste entre rochas de caráter mais ácido das de caráter mais básico, possibilitando a delimitação dos ambientes geológicos com metabasaltos, frequentemente associados, neste caso, à ocorrência de formações ferríferas. Apresentou, portanto, uma resposta contrastante e fundamental para a distinção de locais com maiores possibilidades de ocorrência de formações ferríferas com as características das encontradas na área do estudo.

A segunda PC, tendo no canal do K o maior peso relativo e com carga negativa, apresentou comportamento inverso ao da primeira PC e, portanto, apresentando da mesma maneira o contraste entre rochas de caráter mais ácido das de caráter mais

básico. Não houve contrastes significativos entre as outras litologias presentes na área de estudo, marcando somente, como na primeira PC, a área de ocorrência de metabasaltos, a encaixante imediata das formações ferríferas na região.

A terceira PC, que tem sua maior carga na variável urânio (−0,317) e secundariamente na variável tório (0,256), apresentou comportamento variado e sem significado geológico aparente por toda a área de estudo. Em termos visuais, a quarta PC marca na forma de altos o principal corpo de formações ferríferas. Entretanto, quando comparado com valores anômalos selecionados para toda a área de abrangência do sobrevoo aerogeofísico, esta PC não reconhece anomalias nos canais do potássio, tório, urânio ou contagem total, sendo então considerada como composta apenas de ruídos oriundos do levantamento aerogeofísico.

Portanto a primeira PC é a mais indicada para identificar os contrastes entre rochas ácidas e básicas, com alto grau de equivalência ao canal da contagem total. Outra variável que atuou

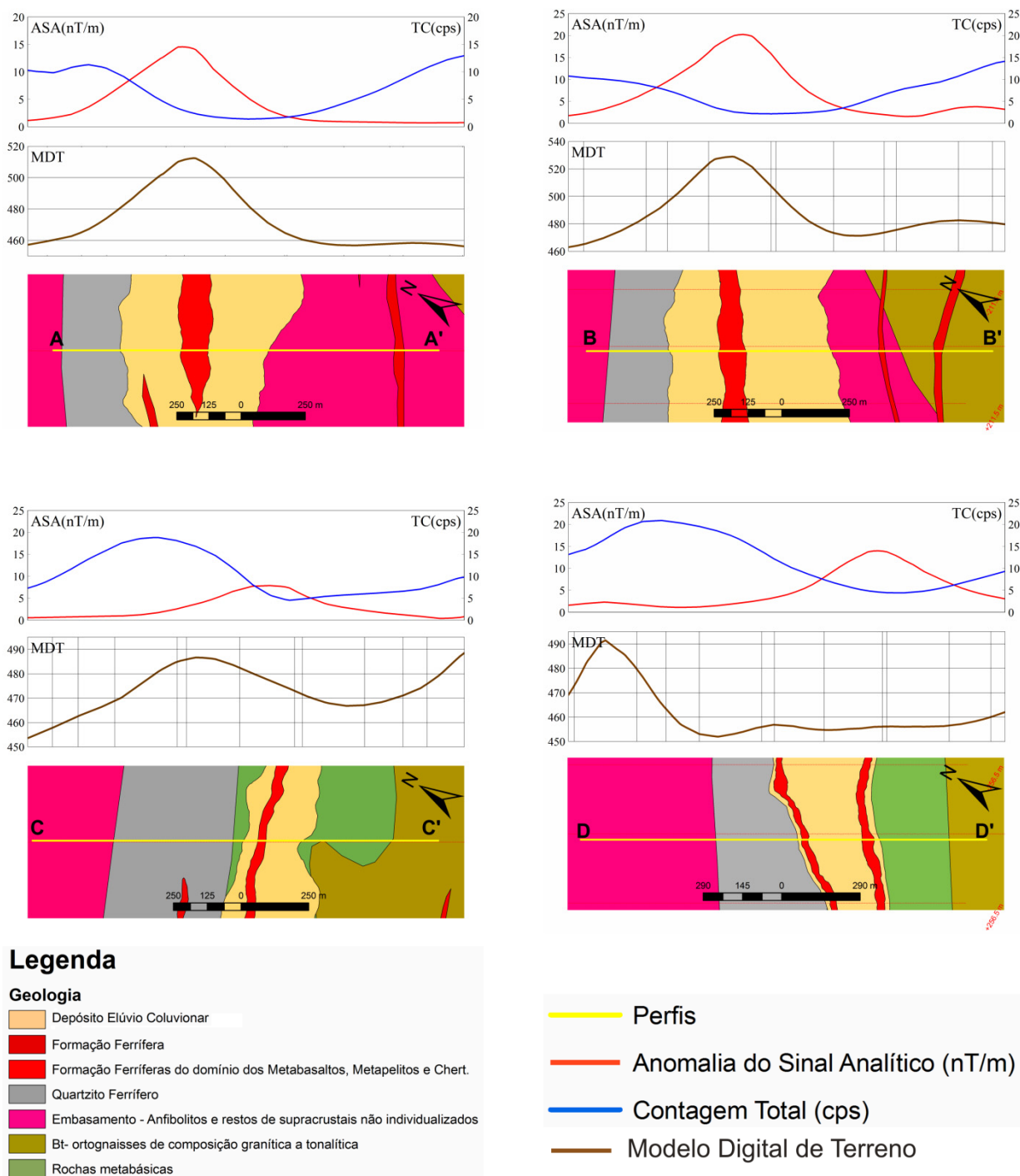


Figura 5 – Perfis dos canais da contagem total e anomalia do sinal analíticos sobrepostos à geologia indicando a ambiência de ocorrência das formações ferríferas.

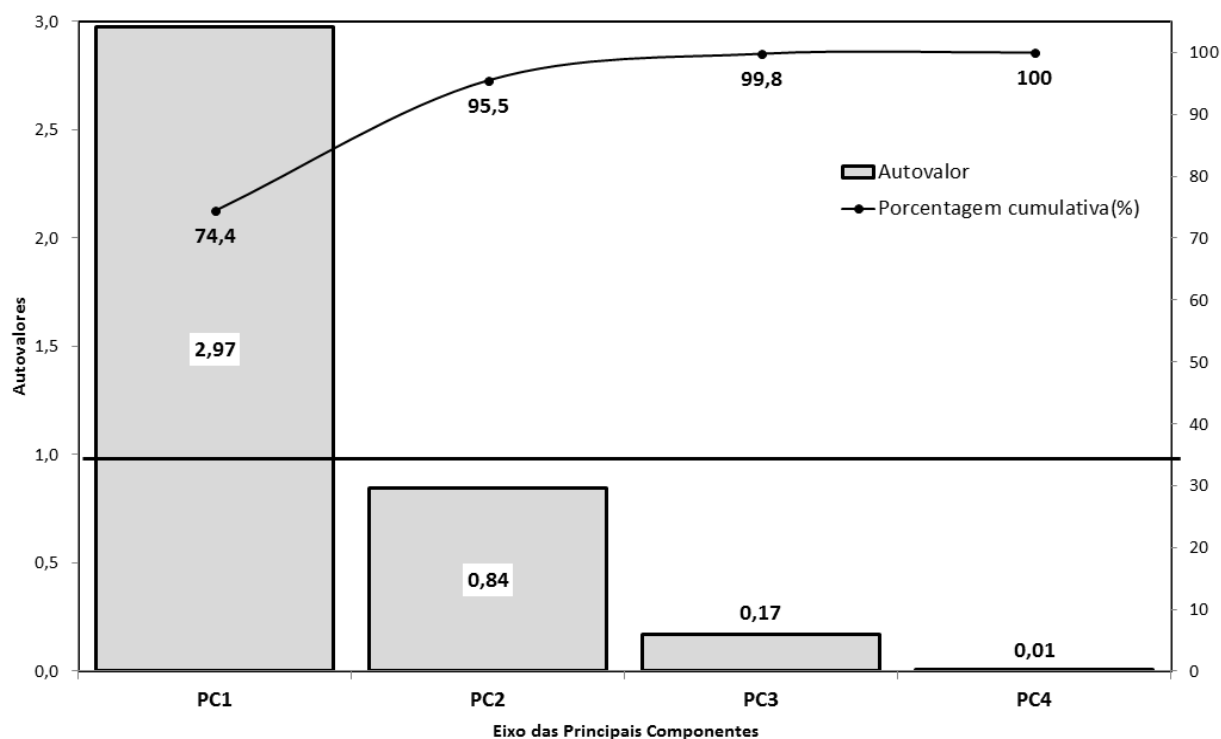


Figura 6 – Gráfico do *Scree plot* para as quatro principais componentes analisadas.

subsidiando a identificação das formações ferríferas foi a topografia que, via de regra, na localidade é sustentada pela geologia das formações ferríferas (Figs. 7 e 8).

CONCLUSÕES

A utilização da técnica das principais componentes em dados gamaespectrométricos mostrou-se efetiva na redução de dimensionalidade, fato comprovado a partir da correlação entre dados de contagem total e da primeira principal componente cujo coeficiente de correlação linear foi de 0,99, indicando uma associação muito forte, quase perfeita.

Apenas a primeira PC foi selecionada com base no Teste de *Scree*, portanto existe a possibilidade de que dimensões subjacentes em relação ao conjunto dos dados analisados podem não ter sido reveladas.

A primeira PC, por sua similaridade aos dados de contagem total, possibilita a inferência de ocorrência de ambientes geológicos associados com rochas metabásicas, apresentando significativo contraste com granitoides da região. Este contraste é importante, pois permite separar rochas encaixantes, em geral granitoides, das rochas metabásicas, principal ambiente geológico de ocorrência de formações ferríferas naqueles depósitos.

Zonas de baixos valores na primeira principal componente equivalem a zonas de baixos valores no canal da contagem total e quando sobrepostas a zonas com altos valores do sinal analítico definem a provável ocorrência de formações ferríferas encaixadas em rochas metabásicas na área investigada.

Portanto, a aplicação da técnica de análise das principais componentes sobre os dados da geofísica nas mineralizações no Distrito Ferrífero de Curral Novo do Piauí, reforça a tese que anomalias negativas no canal da contagem total combinadas com anomalias positivas do sinal analítico representam um quadro favorável para ocorrências de mineralizações ferríferas.

As assinaturas identificadas nas formações ferríferas à magnetita na gamaespectrometria e na magnetometria só são válidas para casos onde as formações ferríferas estão aflorantes ou bem próximas à superfície, haja vista que a investigação via gamaespectrometria tem a limitação da penetração no solo em rochas, ou seja, poucos centímetros em relação à superfície. Esta é, portanto uma das limitações da aplicação da metodologia.

AGRADECIMENTOS

Os autores agradecem à BEMISA – Brasil Exploração Mineral S.A. e à equipe técnica do Projeto Planalto Piauí por viabilizar a realização deste trabalho através do fornecimento dos dados para

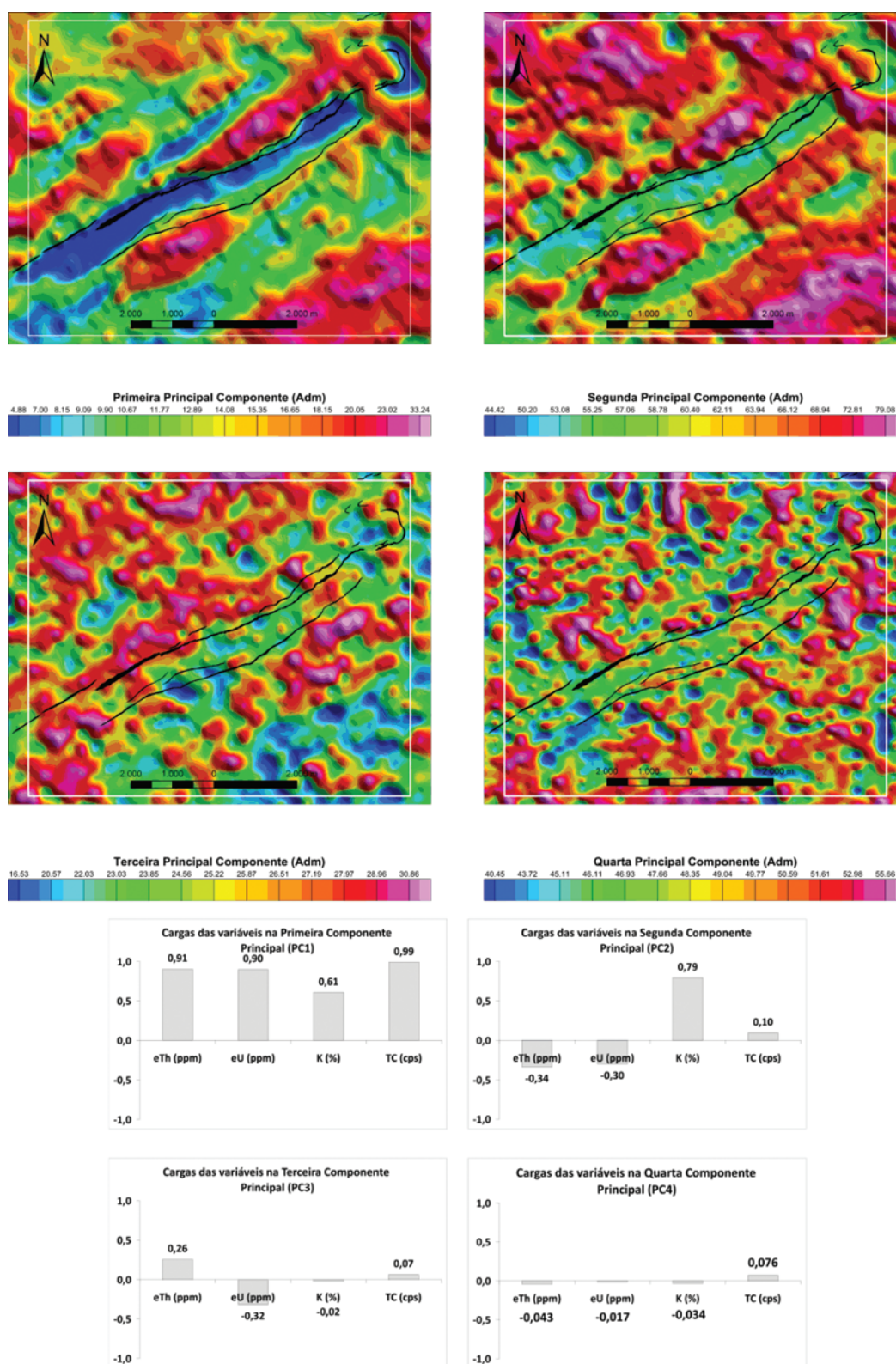


Figura 7 – Mapas das quatro principais componentes analisadas com sobreposição das formações ferríferas identificadas no mapeamento geológico. Os gráficos apresentam as cargas das principais componentes indicando qual das variáveis tem maior influência nos cálculos. As formações ferríferas são mostradas em preto.

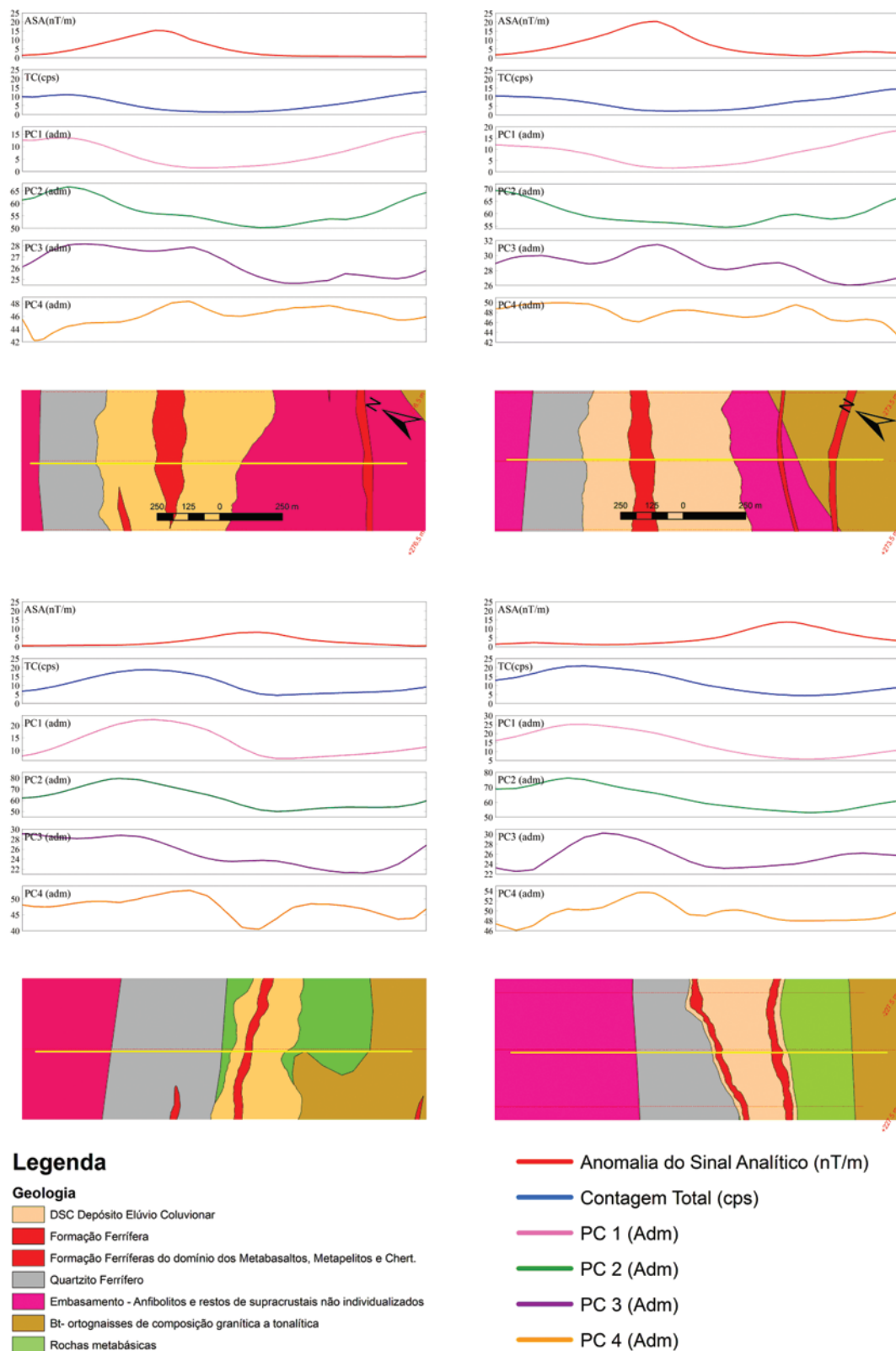


Figura 8 – Perfis dos canais de anomalia do sinal analítico, contagem total, das quatro principais componentes geradas a partir dos dados gamaespectrométricos e perfil da topografia no local de amostragem dos perfis.

a sua execução. Agradecem ainda as críticas e comentários do Dr. Marcelo Monteiro da Rocha e do Dr. Renato Cordani, membros da banca de mestrado do primeiro autor, bem como as críticas e sugestões dos revisores anônimos que contribuíram para o aprimoramento e apresentação da metodologia.

REFERÊNCIAS

- ANGELIM LA de A. 1988. Programa Levantamentos Geológicos Básicos do Brasil: carta geológica, carta metalogenética/previsional – escala 1:100.000 (Folha SC.24-V-A-III Santa Filomena) Estados de Pernambuco e Piauí. Brasília: DNPM/CPRM. 146 p. Il. 2 mapas (*in* bolso).
- BIZZI LA, SCHOBENHAUS C, GONÇALVES JH, BAARS FJ, DELGADO I de M, ABRAM MB, LEÃO NETO R, MATOS GMM & SANTOS JOS. 2001. Geologia, Tectônica e Recursos Minerais do Brasil: Sistema de Informações Geográficas – SIG e Mapas na escala 1:2.500.000 / Brasília: CPRM, 4 CD-ROM.
- BRITO NEVES BB. 1975. Regionalização geotectônica do pré-cambriano nordestino. São Paulo, IGC-USP. Tese de Doutorado. 198 p.
- BRITO NEVES BB, SIAL AN, RAND H & MANSO VAV. 1982. The Pernambuco-Alagoas massif, northeast Brazil. *Revista Brasileira de Geociências*, 12(1-3): 240–250.
- DAVIS JC. 1986. *Statistics and Data Analysis in Geology*. John Wiley & Sons. 646 p.
- DIAS VMD. 2008. As formações Ferríferas do Alvo Manga Velha-Masapê: Comunicação Técnica – Relatório Interno + Mapas.
- GEOSOFT. 2008. Principal Component Analysis (PCA) and Factor Analysis in Oasis Montaj™ – Geosoft Technical Note. Disponível em: <<http://www.geosoft.com/resources/technotes>>. Acesso em: 22 dez. 2008, 12 p.
- GOMES FEM & VASCONCELOS AM. 1991. Programa Levantamentos Geológicos Básicos do Brasil: carta geológica, carta metalogenética/previsional – escala 1:100.000. Levantamento geológico sistemático da Folha Paulistana (SC.24-V-A-II) Estados do Piauí e Pernambuco. Brasília: DNPM/CPRM, 196 p. Contém 2 cartas (*in* bolso).
- HAIR JF, TATHAM RL, ANDERSON RE & BLACK W. 2005. *Análise Multivariada de Dados*. Porto Alegre: Bookman. 593 p.
- MICROSURVEY. 2009. Survey and logistics report on airborne magnetic gradiometry and gammaspectrometric geophysical survey on the Planalto Piauí Project for GME4 – Global Mine Exploration, 32 p.
- RIBEIRO JA & VASCONCELOS AM. 1991. Programa Levantamentos Geológicos Básicos do Brasil: carta geológica, carta metalogenética/previsional – escala 1:100.000 (Folha SF.24-Y-C-VI Simões) Estados de Pernambuco e Piauí. Brasília: DNPM/CPRM. 124 p. Il. 2 mapas (*in* bolso).
- SAMPAIO T de Q. 1991. Programa Levantamentos Geológicos Básicos do Brasil: carta geológica, carta metalogenética/previsional – escala 1:100.000 (Folha SC.24-V-A-V Afrânio) Estados de Pernambuco, Piauí e Bahia. Brasília: DNPM/CPRM. 144 p. Il. 2 mapas (*in* bolso).
- SANTOS EJ. 1996. Ensaio Preliminar sobre terrenos e tectônica acrescionária na Província Borborema. In: SBG, Congresso Brasileiro de Geologia, 39., 1996, Salvador, Anais, 6: 47–50.
- SANTOS EJ & BRITO NEVES BB. 1984. Província Borborema. In: ALMEIDA FFM & HASUY Y (Coord.). *O pré-cambriano do Brasil*. Edgard Blucher, p. 123–186.
- SCHEID C & FERREIRA CA. 1991. Programa Levantamentos Geológicos Básicos do Brasil: carta geológica, carta metalogenética-previsional – escala 1:100.000 (Folha SB.24-Z-D-I Patos) Estados de Pernambuco e Paraíba. Brasília, DNPM/CPRM.
- SILVA LC, McNAUGHTON NJ, VASCONCELOS AM, GOMES JRC & FLETCHER IR. 1997. U/Pb SHRIMP ages in Southern state of Ceará, Borborema Province, NE Brazil: Archean TTG Accretion and Proterozoic Crustal Reworking. In: CBPM, International Symposium on Granites and Associated Mineralizations – ISGAM, 2., Salvador, Extended Abstract and Program, 280–281.

NOTAS SOBRE OS AUTORES

Enos Nobuo Sato trabalhou entre 2006-2011 como geólogo de exploração e assessor de diretoria da BEMISA – Brasil Exploração Mineral S.A. Atualmente faz MBA em Finanças, na Fundação Instituto de Administração – FIA e trabalha como pesquisador nas áreas de geofísica e metalogênese. Graduiu-se em Geologia no ano de 2006 e tornou-se mestre em recursos minerais em 2011, ambos pelo Instituto de Geociências da Universidade de São Paulo.

Teodoro Isnard Ribeiro de Almeida graduou-se em Geologia pela Universidade de São Paulo (1977), mestrado em Sensoriamento Remoto pelo Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais (1982), doutorado em Geociências (Recursos Minerais e Hidrogeologia) pela Universidade de São Paulo (1991) e pós-doutorado em geobotânica na Universidade de Toulouse III (1999). Funcionário do Grupo Votorantim (1980-1990), trabalhando com prospecção mineral e reavaliação de jazida de magnesita. Professor do Instituto de Geociências da Universidade de São Paulo desde 1990 onde, entre outras funções, coordenou o Programa de Pós-Graduação em Recursos Minerais e Hidrogeologia (2002-2011) e foi editor associado (1992-2002) dos periódicos do Instituto de Geociências – USP.

Vilson Marques Dias graduou-se em Geologia pela Universidade Federal da Bahia em 1975, especialização em Geologia Econômica pela Universidade Federal da Bahia em 1978. Professor do Instituto de Geociências da Universidade Federal da Bahia no período entre 1976-2005, atuando na área de Geologia Estrutural e Mapeamento Geológico. Atualmente, trabalha como geólogo de exploração e pesquisa de detalhe da BEMISA – Brasil Exploração Mineral S.A. e exerce a função de gerente do Projeto Planalto Piauí.

Jorge Kazuo Yamamoto graduou-se em Geologia pelo Instituto de Geociências – USP em 1976. Foi geólogo pesquisador do Instituto de Pesquisas Tecnológicas – IPT e atualmente é professor titular do Departamento de Geologia Sedimentar e Ambiental do Instituto de Geociências – USP. Sua linha de pesquisa principal está focada em técnicas geoestatísticas de estimativa e simulação, com ênfase na medida e análise de incerteza.