ANÁLISE DA FAVORABILIDADE PARA DEPÓSITOS DE CAULIM NA BACIA DE CAMPO ALEGRE (SC)

JOÃO C. BIONDI, MARCELO K. BARTOSZECK E GUILHERME A. VANZELA

RESUMO Os grandes depósitos de caulim da região de Campo Alegre foram gerados pela conjunção de ao menos uma fase de alteração hidrotermal, seguida por diversas fases de alteração supergênica. Além da caulinitização, ilitização/muscovitização e silicificação, o hidrotermalismo causou também a formação de zonas piritizadas e de zonas propilitizadas a quartzo + clorita. No conjunto, as diversas alterações hipogênicas descritas são muito semelhantes àquelas que ocorrem junto aos depósitos vulcanogênicos epitermais de ouro de alta sulfetação. Os fatores diagnósticos das mineralizações de caulim da região de Campo Alegre são: (1) a maioria das grandes minas de caulim da parte sul da bacia de Campo Alegre estão distribuídas segundo uma faixa arqueada, com cerca de 13 quilômetros de comprimento e 1500 metros de largura, orientada paralelamente a alinhamentos estruturais e intrusões que marcam a borda leste da Bacia; (2) as minas e ocorrências estão sempre em meio a rochas riolíticas e/ou traquíticas; (3) as minas estão em uma superfície de aplainamento entre 960 e 1060 m de altitude; e (4) as minas estão em regiões com declividade < 15%. (5) 17 dos 20 depósitos analisados estão em zonas com teores muito elevados de K_2O , maiores que 3,04% e menores que 4,00%. (6) O "fator F" = $(K.U)/Th$ indica as zonas hidrotermalizadas melhor que os teores equivalentes de potássio. Praticamente todas as grandes minas da região estão em locais onde o "fator F" é elevado, variando de 10,22% a 15,47%. Finalmente, (7) a presença de ocorrências de caulim em superfície é sempre indicadora de depósitos minerais, cujas dimensões podem ou não ser econômicas. Esses fatores, usados em conjunto, foram considerados como diagnósticos da presença de depósitos minerais de interesse econômico. Dêles foram derivados os ponderadores que possibilitaram o cálculo dos índices de favorabilidade para caulim da região de Campo Alegre. Os resultados foram expressos em um Mapa de Favorabilidade

Palavras chave: Índice de Favorabilidade, Depósitos de caulim, Campo Alegre (SC)

ABSTRACT Kaolin and gold favorability analysis of Campo Alegre Basin (Brazil – SC) The most important kaolin deposits from Campo Alegre region (SC) were formed by the conjunction of at least one hydrothermal phase, followed by several supergenic weathering phases. Possibly deposits formed by only one of these processes exist, but these deposits shall be small and smaller than those mined today. Besides kaolinization, illitization/muscovitization and silicification, hydrothermalism also generated pyritized and propilitized zones, with quartz + chlorite. Together, hypogenic alteration related to kaolin deposits are very similar to alteration related to high sulfidation epigenetic volcanogenic gold deposits. Most part of the biggest kaolin mines from the southern part of Campo Alegre Basin are distributed along a 13 Km long and 1,5 Km width bent zone that is parallel to structural alignments that point out the eastern border of the basin. This zone was originated by deformation that has folded and broken rocks, generating a fault system alongside and parallel to structural lineaments. This fault system has made possible the ascent of hydrothermal hot aqueous fluids and of dikeform intrusions that caused hydrothermalism genetically related to kaolin deposits. Gammasspectrometry may indicate hydrothermalized zones. Although the potassium equivalent rock contents, derived from aerial gammasspectrometry of the mine regions, varie from a minimum of 2,07% to a maximum of 4,00%, 17 of the 20 mines are on high grade regions, with equivalent potassium contents greater than 3,04% and lower than 4,00%. The "F factor" (= $(K.U)/Th$) seems to indicate hydrothermalized zones better than potassium equivalent rock contents. Practically all the biggest mines on region are placed where "F factor" is large, bigger than 10,22% and lower than 15,47%. The biggest mines are also restricted to regions with altitudes between 960 and 1060 m, and were indicated by kaolin occurrences on surface. These controls were considered to be diagnostic factors, and taken into consideration to calculate the weights of the Favorability Index. The distribution of favorability index was expressed as a Favorability Map that shows areas with greater possibilities to have kaolin deposits.

Key words: Favorability Index, Kaolin deposits, Campo Alegre (SC, Brazil)

INTRODUÇÃO Na região da Bacia de Campo Alegre (SC) há 22 minas de caulim em operação e outros 30 depósitos já descobertos e dimensionados. O caulim lavrado nessa região abastece fábricas de cerâmica de mesa, de revestimentos e refratários de toda a região sul do país há mais de 30 anos. Apesar da importância econômica desses depósitos e minas, poucos estudos foram feitos visando compreender os controles das mineralizações conhecidas e daí derivar critérios de prospecção de novos depósitos do mesmo tipo ou de depósitos de novos tipos, de caulim ou de outros bens minerais relacionados. O objetivo desse trabalho é sintetizar os principais critérios que podem ser usados para a prospecção desses depósitos. Essa síntese será feita com base na estatística multivariada e na análise das componentes principais e permitirá o cálculo do índice de favorabilidade, cuja dimensão é proporcional ao potencial de um dado local para conter depósitos minerais dos tipos desejados.

CONSTRUÇÃO DE MAPAS DE FAVORABILIDADE BASEADOS NA ESTATÍSTICA MULTIVARIADA E NA ANÁLISE DE COMPONENTES PRINCIPAIS. Conceitos gerais: G. Pan (1993) propôs a "Teoria da Favorabilidade Regionalizada", que representa o embasamento teórico de um modelo numérico de prospecção que pode ser usado para definir alvos e prioriza-los em função de um ou mais modelos descritivos de depósitos previamente conhecidos. Diversas variantes do modelo de Pan (op.cit.) têm sido propostos (Harff et al. 1992; McCammon et al. 1994; Wang et al. 1994; Pan & Porterfield 1995), todas apoiadas no mesmo embasamento teórico e operando dentro de uma mesma sequência de etapas básicas, que serão mostradas a seguir.

Todos os modelos de prospecção desenvolvidos com base em um índice de favorabilidade exigem que a área a ser avaliada seja dividida em subáreas denominadas células. Todas as células deverão ser

idênticas em forma e dimensão e, ao término do desenvolvimento do modelo, a cada uma delas será atribuído um número, denominado índice de favorabilidade, cuja dimensão será diretamente proporcional à prioridade que se deve dar para prospectar cada célula.

Existem dois tipos básicos de células: as células padrão, ou modelo, e as células normais, ou somente células. As células padrão ou modelo contêm depósitos minerais dos modelos que serão prospectados nas outras células. São células muito bem conhecidas geologicamente, tanto em superfície (mapa geológico de detalhe, mapas de anomalias geoquímica e geofísica, etc.), como em subsuperfície (sondagens, galerias, etc.) e conceitualmente (modelo descritivo, modelo conceitual, etc.). Sobre essas células serão calculados os valores básicos (ponderadores w) para o cálculo dos índices de favorabilidade de todas as outras células a serem prospectadas.

As informações usadas para o cálculo do índice de favorabilidade podem ser quantitativas (numéricas) e/ou qualitativas. Em ambos os casos essas informações devem ser transformadas para valores 0 e 1 ou -1, 0 e 1.

O índice de favorabilidade f é calculado individualmente para cada célula j com a equação:

$$f_j = w_1 \cdot aj_1 + w_2 \cdot aj_2 + w_3 \cdot aj_3 + \dots + w_n \cdot aj_n \quad (1)$$

Onde os termos significam:

f_j = índice de favorabilidade da célula j , uma célula qualquer de um conjunto de células iguais em dimensão que cobrem toda a área a ser prospectada.

aj_1, aj_2, aj_3, aj_n = valores transformados das variáveis a_1, a_2, a_3, a_n , medidos na célula j .

w_1, w_2, w_3, w_n = ponderadores das variáveis a_1, a_2, a_3, a_n , calculados nas células modelo.

Os ponderadores w_i são obtidos nas células modelo resolvendo-se a equação matricial:

$$(A' \cdot A) \cdot w_i = 1 \cdot w_i \quad (2)$$

Onde os termos significam:

A = matriz original composta pelas variáveis transformadas a_i (a_1, a_2, a_3, a_n) medidas nas células padrão. Essa matriz terá dimensão $c \cdot v$, com c linhas, cada uma correspondente a uma célula padrão onde a variável a_i tenha sido identificada, e v colunas, cada uma correspondente a uma variável a_i .

A' = matriz transposta de A com dimensão $v \cdot c$, com v linhas e c colunas. Notar que a matriz resultante do produto $A' \cdot A$ será $(v \cdot c) \times (c \cdot v)$, logo, será uma matriz $v \cdot v$, de variável contra variável (a multiplicação de $A \cdot A'$ geraria uma matriz $c \cdot c$, de célula contra célula, que nada significa na análise de correlação a ser feita).

w_i = ponderador de cada uma das variáveis a_i . Cada ponderador w_i de a_i corresponde a um elemento do maior vetor ("eigenvector") correspondente ao maior "maior valor" (maior "eigenvalue") da matriz resultante do produto entre as matrizes A e A' .

λ = maior "maior valor" (maior "eigenvalue") da matriz resultante do produto entre A e A' .

Portanto, a determinação dos ponderadores w_i resulta do cálculo do maior vetor correspondente ao maior "maior valor" da matriz produto entre A e A' . As etapas que devem ser cumpridas para o uso desta técnica de prospecção são descritas a seguir.

Etapas para o desenvolvimento de modelos de prospecção baseados no cálculo de um índice de favorabilidade: SELEÇÃO DOS MODELOS DE DEPÓSITOS A SEREM PROSPECTADOS

Um ou mais modelos descritivos de depósitos minerais podem ser usados como base para a definição dos ponderadores necessários ao cálculo do índice de favorabilidade. Uma ou mais áreas de controle (áreas padrões às quais as áreas a serem prospectadas serão comparadas), contendo depósitos dos mesmos modelos que se quer encontrar, devem ser usadas para definir e quantificar os limites das variáveis a serem usadas na prospecção. É importante que os modelos descritivos adotados contenham informações geofísicas e geoquímicas, ou seja, que sejam conhecidas os tipos de anomalias geofísicas e geoquímicas que caracterizam depósitos dos modelos que se quer prospectar.

DEFINIÇÃO DAS VARIÁVEIS: Normalmente as variáveis a serem usadas no cálculo do índice de favorabilidade são classificadas como variáveis explicativas ("explanatory") e variáveis alvo ("target"). Variáveis explicativas são aquelas que quantificam características físicas e químicas de objetos geológicos associados aos depósitos minerais dos modelos prospectados. Valores das anomalias da prospecção geoquímica e/ou geofísica são variáveis explicativas. Esse tipo de dado fornece informações indiretas da presença do depósito mineral. Variáveis alvo são aquelas que fornecem informações diretas e bem definidas da presença de depósitos minerais do modelo procurado. São variáveis de alta necessidade e/ou de alta suficiência para o modelo em questão. A presença, em superfície, de ocorrência de caulim seria um exemplo desse tipo de variável.

INTERPOLAÇÃO E FILTRAGEM: Uma vez escolhidas nas células modelos as variáveis que serão usadas para o cálculo do índice de favorabilidade de cada célula, essas variáveis devem ser procuradas em cada uma das células da área a ser prospectada. Para isso a área deve ser dividida em células iguais e a presença de cada variável deve ser marcado no centro de cada uma dessas células. Caso a variável não seja numérica, a sua presença ou ausência será indicada por "sim" e "não", respectivamente, ou por 1 e 0. A krigagem, usada quando se tem uma variável numérica "hard" (como teor, espessura de camada, etc), ou a cokrigagem, quando se deseja interpolar uma variável "hard" apoiada em uma variável "soft" (geofísica ou geoquímica, por exemplo), são as técnicas de interpolação mais recomendadas, dado serem as que resultam em valores com menores possibilidades de

envieçamento e com menores variâncias em torno da média (Journel e Huijbregts 1978; David 1988; Isaaks e Srivastava 1989; Annels 1991; Carr 1995; Wellmer, 1999, entre outros). A média movel é outra técnica de interpolação passível de ser usada (McCammon *et al.* 1994), embora menos recomendável que as krigagens.

ESTIMATIVA DOS PONDERADORES (w_i) DE CADA UMA DAS VARIÁVEIS SELECIONADAS: Após transformadas (regularizadas, padronizadas ou transformadas em logaritmo) faz-se uso das células padrão para calcular os ponderadores w_i de cada variável. Para isso é usada a equação (2) mostrada anteriormente. O melhor modo de avaliar a qualidade da função de favorabilidade estimada para uma área é testar se, com a função estimada, obtém-se prioridade de exploração mais alta para as células padrão. Os índices de favorabilidade podem ter qualquer dimensão numérica. Embora isso não seja imprescindível, é usual que os índices das células sejam regularizados (transformados proporcionalmente em valores entre 0 e 1) antes de ser interpretados.

ÍNDICE DE FAVORABILIDADE PARA CAULIM E OURO NA REGIÃO DA BACIA DE CAMPO ALEGRE

Geologia geral da Bacia de Campo Alegre A bacia de Campo Alegre (Fig. 1) foi mapeada por Daitx em 1979 e teve sua geologia revista por Silva (1987), durante a elaboração do Mapa Geológico do Estado de Santa Catarina na escala 1:500.000, e por Citroni (1998). É uma bacia vulcano-sedimentar composta essencialmente por vulcanitos ácidos e sedimentos vulcanogênicos derivados, com características de uma bacia tardi-orogênica. Suas rochas vulcânicas foram datadas pelo método Rb-Sr em 536 ± 65 Ma (Basei & Teixeira, 1987) e pelo método U-Pb em 570 ± 30 Ma (Citroni, 1998).

Formação Campo Alegre foi definida por Ebert (1971) como parte do Grupo Guaratubinha. Daitx (1979) e Silva (1987) dividiram-na em cinco unidades e a situaram no Grupo Itajaí. Citroni (1998) e Citroni & Basei (1999) propuseram uma divisão da bacia de Campo Alegre em nove formações contidas em dois Grupos (Grupo Bateias e Grupo Campo Alegre). Nenhum desses trabalhos aborda o estudo dos depósitos de caulim.

A Bacia de Campo Alegre contém, na base, conglomerados e arcósiolos intercalados com lavas traquíticas (predominantes), andesíticas e básicas (menos frequentes). Sobre essas unidades depositaram-se várias sequências vulcânicas com derrames, brechas, tufo e cinzas com composições essencialmente riolítica e traquítica. Durante essa fase vulcânica as rochas foram alteradas por fluidos quentes de origem profunda (hidrotermais) e por fluidos superficiais (metéoricos). Ao final do vulcanismo a parte norte da bacia foi coberta por sedimentos clásticos finos e médios interpretados (Citroni 1998, Citroni & Basei 1999) como depositados em um lago formado dentro de uma caldeira vulcânica. Todas essas unidades formaram-se há cerca de 530-570 Ma.

Após preenchida a bacia de Campo Alegre, as suas rochas de cobertura ficaram expostas por cerca de 260-300 Ma, até o início do Permiano, quando a região foi recoberta pelo mar que proporcionou o início da deposição dos sedimentos do Grupo Itararé, da Bacia do Paraná. É muito difícil avaliar quanto foi erodido antes da deposição do Itararé e quais as modificações intempéricas e estruturais causadas nas rochas da Campo Alegre nesse período de cerca de 300 Ma. É igualmente difícil avaliar quais as consequências da imersão no mar Itararé e do soterramento das rochas da Campo Alegre sob as rochas da Bacia do Paraná, mas certamente as rochas vulcânicas não passaram incólumes por esses eventos.

A exumação das rochas da bacia de Campo Alegre deve ter acontecido há poucos milhões de anos, pois a diferença de cota entre rochas do Itararé depositadas diretamente sobre o embasamento gnáissico (em São Bento do Sul) e sobre a superfície atual da Campo Alegre é de cerca de 100 metros apenas. Após a exumação, novamente as rochas vulcânicas foram submetidas a ciclos de intemperismo e de erosão, até adquirirem a conformação e a composição da superfície atual. Os depósitos de argilo-minerais são produtos dessa história geológica.

Modelo para os depósitos de caulim e ouro em Campo Alegre Biondi (1998), Biondi & Furtado (1999) e Biondi (1999) descreveram quatro depósitos de caulim da região de Campo Alegre. Nesses trabalhos foram caracterizadas várias fácies de minérios e foi proposto um modelo genético/evolutivo para os depósitos da mina Floresta e da mina Cambuí.

A caulinizacão está relacionada à conjunção de uma fase de altera-

Figura 1: Mapa geológico da região da Bacia de Campo Alegre (SC). Notar a posição das minas de caulim, identificadas por nomes e números, e das ocorrências de caulim, identificadas por círculos.

ção hidrotermal seguida por diversas fases de alteração supergênica. O hidrotermalismo aconteceu durante o vulcanismo, junto às fraturas, intrusões e/ou aos aparelhos vulcânicos ativos na época. O intemperismo (alteração supergênica) foi facilitado nos locais onde o hidrotermalismo havia alterado e enfraquecido as rochas. A conjunção desses dois fatores de alteração proporcionou o aparecimento dos grandes depósitos de caulim existentes na região.

Na região da mina Planalto Alegre (Fig. 1), além de ter participado da gênese do depósito de caulim, o hidrotermalismo manifesta-se tam-

bém como um sistema de zonas de alteração que sugerem a presença de depósitos vulcanogênicos epitermais de ouro, tipo "high sulfidation" (Newman *et al.* 1995, Hedenquist *et al.* 1996; Biondi & Furtado 1999; Biondi 1999). É provável que sistemas de alteração do mesmo tipo existam em outros locais da região de Campo Alegre e as regiões dos depósitos de caulim seriam locais preferenciais.

Fatores diagnósticos da existência de depósitos de caulim na região de Campo Alegre. As células que con-

têm minas (Fig. 1) foram consideradas células padrão. Nessas células foram testadas as presenças de cada um dos fatores diagnósticos abaixo descritos. Os resultados estão na Tabela 1. O número 1 indica que na célula padrão o fator diagnóstico (controle geológico) foi encontrado e o número zero indica a sua ausência. Esse conjunto de números 1 e 0 constitui a matriz **A**, da equação (2), usada para calcular os pesos (ponderadores w_i) de cada fator diagnóstico.

ROCHAS PREFERENCIAIS: Os depósitos de caulim formaram-se às expensas das rochas riolíticas e traquíticas. Não são conhecidos depósitos sobre as rochas sedimentares da unidade basal (de ambiente fluvial, com conglomerados e arcósios), da unidade superior (lago de caldeira, com arenitos, siltitos e ritmitos) nem sobre os basaltos.

CONTROLE ESTRUTURAL: Das 22 minas de caulim da região de Campo Alegre, as 14 maiores minas estão dentro e 2 duas outras minas pequenas estão a menos de um quilômetro de distância de uma faixa arqueada, com cerca de 13 quilômetros de comprimento e 1,5 quilômetros de largura, orientada paralelamente à borda leste da Bacia (Fig. 1). Esta faixa contém um conjunto de falhas e diques paralelos a borda leste da Bacia. Essas estruturas possibilitaram a ascensão de fluidos hidrotermais aquosos que causaram o hidrotermalismo geneticamente relacionado a esses depósitos (fraturamento hidráulico, caulinizacão, ilitização e muscovitização).

Tanto essas falhas quanto a sequência alinhada de minas de caulim são interrompidas, a norte, por um sistema de falhas EW que corta a Bacia de borda a borda (Fig. 1). As rochas afetadas por essas falhas também estão muito transformadas, intensamente intemperizadas e com fortes evidências de hidrotermalismo. A mina de caulim do Planalto Alegre está na região de intersecção dos dois sistemas e é a mina mais a norte contida no sistema de falhas paralelo a borda leste da Bacia.

As minas Kowalski, Turvo, Incepa (Mina 1) e Bateias estão ao norte do sistema de falhas EW. As observações feitas nos três primeiros depósitos os enquadra no mesmo modelo genético existente ao sul. É possível que o sistema hidrotermal que controlou a gênese desses depósitos esteja relacionado ao grande complexo vulcânico de Campo Alegre (Fig. 1). Bateias, ainda em estudo, mostra evidências de ter sido gerado em um ambiente diferente daqueles dos outros depósitos, devendo pertencer a um outro modelo.

O exame de afloramentos mostrou que as falhas do sistema EW são sinsedimentares e devem ter sido nucleadas no início da abertura da Bacia de Campo Alegre. Em uma fase posterior de deformação, elas foram reativadas com falhas levóginas em um sistema transpressivo. São falhas profundas que, como aquelas do sistema NS, também possibilitaram a formação de sistemas hidrotermais e o alojamento de intrusões. Não foi possível estimar as componentes vertical nem horizontal dos rejeitos desse sistema de falhas, mas o fato de interromper o sistema NS faz crer que esses rejeitos tenham sido importantes.

HIDROTHERMALISMO: Os depósitos de caulim de grande porte formaram-se pela conjunção entre um processo de alteração hidrotermal vulcanogênica (hipogênica), antigo, e outro de alteração intempérica (supergênica), ainda hoje atuante (Biondi 1998, Biondi & Furtado 1999; Biondi 1999). Biondi *et al.* (1999) mostraram que os fluidos hidrotermais modificaram as rochas, percolando-as em ambientes tensionais (rede de fraturas abertas, geradas por fraturamento hidráulico), quando foi gerado minério branco, e em ambientes compressoriais (fraturas fechadas, formadas por cisalhamento), quando foi gerado minério verde. Esses tipos de feições de hidrotermalismo foram identificadas em todos os depósitos de caulim de grande porte situados em zonas fraturadas (Fig. 1).

Além da caulinizacão, ilitização/muscovitização e silicificação, o hidrotermalismo causou também a formação de zonas piritizadas, com pirita disseminada e em vênulas, e de zonas propilitizadas, a quartzo + clorita.

EVIDÊNCIAS GEOFÍSICAS: Os minérios verdes foram gerados por ilitização/muscovitização hidrotermal das rochas vulcânicas. Os minérios brancos associam-se a zonas com feldspato K (adulária). Adulária, ilita e as muscovita são minerais potássicos, o que implica que o hidrotermalismo proporcionou o enriquecimento das regiões mineralizadas (minérios verdes e, em parte, minérios brancos) em potássio. A radioatividade do potássio 40, do urânio e do tório vem sendo

Figura 2: Mapa de isovalores dos teores equivalentes de K, calculados a partir de levantamento aerogamaespectrométrico.

Figura 3: Mapa de isovalores dos teores equivalentes de U, calculados a partir de levantamento aerogamaespectrométrico.

Figura 4: Mapa de isovalores dos teores equivalentes de Th, calculados a partir de levantamento aerogamaespectrométrico.

Figura 5: Mapa de isovalores dos teores equivalentes de K normalizados pelos teores de Th, calculados a partir de levantamento aerogamaespectrométrico.

Figura 6: Mapa de isovalores do "fator F " $= (K.U)/Th$, calculados a partir de levantamento aerogamaespectrométrico

usada como indicadora da presença de zonas hidrotermalizadas desde 1973 (Ostrovsky 1973, in Gnojek & Prichystal 1985).

A região da Bacia de Campo Alegre foi toda coberta pelo Projeto Aerogeofísico Serra do Mar Sul (Geofoto-CPRM-DNPM 1978), no qual foram feitas medidas aerocintilométricas das radioatividades do K, do U e do Th e radioatividade total. Esses dados foram processados com o auxílio do programa GEOSOFT, resultando nos mapas das Figuras 2 a 5. Nas Figuras 2, 3 e 4 tem-se, respectivamente, os teores equivalentes de K, de U e de Th obtidos desse processamento. Essas Figuras mostram, também, os limites das Bacia de Campo Alegre (Daitx 1979; Citroni 1998) e as posições das maiores minas de caulim da região, identificadas na Figura 1.

Embora os teores equivalentes de potássio das regiões onde estão as minas variem de um mínimo de 1,44% até um máximo de 4,00% (Fig. 2), 17 dos 20 depósitos considerados estão em zonas com teores muito elevados, maiores que 3,04% e menores que 4,00%. Notar, na Figura 2, a forte anomalia de K situada imediatamente a sul da cidade de Campo Alegre. Esta anomalia engloba todo o complexo vulcânico situado naquele local (Fig. 1) e estende-se até a região de intersecção do grande lineamento EW (que contém a mina de Campo Alegre) com o lineamento NS, que define a faixa estrutural onde se situam a maior parte dos depósitos de caulim da região (Fig. 1). Notar, também, que a mina de caulim de Bateias, a maior mina situada ao norte de Campo Alegre, ocupa uma região com teores equivalentes de K iguais aos da maior parte das minas do sul, entre 3,04% e 4,00%. A grande anomalia situada fora da bacia, na sua borda sul, identifica a área de afloramento do granito Corupá (Daitx 1979; Silva 1987).

Segundo Saunders *et al.* (1993), a normalização dos teores de potássio pelos teores de tório suprimiria os efeitos sobre os teores equivalentes de K provocados por variações litológicas, tipos de solos e por condições ambientais. A partir dos valores de K da Figura 2 e de Th da Figura 4, e usando os critérios de normalização descritos por Saunders *et al.* (*op.cit.*) e por Pires (1995), obteve-se a Figura 5, com os teores de potássio normalizados pelos de Th. Notar (Fig. 5) que após a normalização persistem muito fortes as anomalias a sul de Campo Alegre, mas tornam-se menos evidentes as anomalias da faixa mineralizada NS e da mina Bateias, a norte de Campo Alegre. Este fato mostra que o teor de K normalizado pelo Th não é um bom indicador dos depósitos de caulim. Por isso não foi considerado como fator di-

agnóstico no cálculo do índice de favorabilidade. O mesmo acontece com os teores equivalentes de U e de Th.

Efimov (1978, in Gnojek e Prichystal 1985), introduziu o uso do chamado "fator F", determinado pela relação $F=(K.U)/Th$, na qual K (Fig. 2), U (Fig. 3) e Th (Fig. 4) são teores equivalentes desses elementos calculados a partir da gamaespectrometria. O fator F, na forma como é calculado, corrige a radioatividade provinda de outras fontes que não o potássio 40, e é considerado um indicador de zonas hidrotermalizadas melhor que os teores simples de K, U ou Th. A Figura 6 mostra a distribuição dos valores do "fator F" na região em estudo. Notar que o mapa é muito parecido àquele dos teores equivalentes de potássio (Fig. 2), com a exceção de o "fator F" praticamente excluir o granito Corupá como "zona hidrotermalizada". Isto indica que esse "fator" tende a eliminar influências litológicas e sugere ser ele um bom indicador de mineralizações hidrotermais na região. Praticamente todas as grandes minas da região estão em locais onde o "fator F" é elevado, variando de 10,22% a 15,47%. As exceções, como no caso do potássio (Fig. 2), são as minas da Floresta, Cavalheiro e Mina 19, no extremo sul da Bacia.

CONTROLES GEOMORFOLÓGICOS: Paleoplanos A influência do intemperismo (alteração supergênica) na gênese dos depósitos de caulim da região de Campo Alegre é considerada importante, porém muito difícil de ser dimensionada (Biondi & Furtado 1999, Biondi 1999, Biondi *et al.* 1999). Conforme acima mencionado, o longo período de exposição ocorrido após o preenchimento da Bacia dificulta

a determinação do tipo da superfície de erosão atual e, sobretudo, o controle desta superfície sobre as mineralizações de caulim.

Para analisar a existência de controles geomorfológicos sobre as mineralizações da região foi construído o modelo digital de elevação (MDE) da região de Campo Alegre. Desse modelo foi gerado um arquivo com as altitudes de 800 pontos situados dentro dos limites da Bacia de Campo Alegre e um arquivo com as altitudes médias (10 medidas em cada mina) das 22 maiores minas de caulim da região. Com esse trabalho foi possível perceber a existência de seis patamares, ou superfícies, distintos. A Figura 7A mostra os limites dessas seis superfícies. É fácil notar, observando a Figura 7A, que todas as grandes minas de caulim da região estão em altitudes entre 960 e 1060 m. A média das altitudes ($t=95\%$) dessas minas é $1012,1 \pm 13,8$ m. A Figura 7B ressalta este fato, mostrando o intervalo de altitudes 960 – 1060 m e as posições das minas.

As superfícies erosivas da região de Campo Alegre, limitadas pelas cotas 1020-1060 m e 920-1020 m (Figs 7A e B), são prováveis equivalentes dos paleoplanos Alto Iguaçu e Curitiba, respectivamente (Ab'Sáber & Bigarella, *op.cit.*). É notável o controle exercido por esses paleoplanos sobre a localização das grandes minas de caulim da região (Fig. 7B).

Preservação O modelo genético proposto para os depósitos de caulim de Campo Alegre considera imprescindível à formação dos depósitos a existência de uma fase de alteração supergênica associada a uma fase de peneplanização. Logo, regiões que não tenham sido

Fig. 7: (A) Mapa da região da Bacia de Campo Alegre (SC) mostrando as áreas ocupadas por cada uma das superfícies de aplainamento identificadas na área. Notar que as 22 maiores minas de caulim da região estão situadas em altitudes entre 960-1020 m (12 minas) e 1020-1060 m (11 minas). (B) A superfície limitada pelas cotas 960 e 1060 m contém todas as grandes minas de caulim da região de Campo Alegre. Essa superfície corresponde a paleoplanos equivalentes aos do Alto Iguaçu e Curitiba, do Estado do Paraná. A alteração supergênica que contribuiu para a geração dos depósitos de caulim está relacionada à existência desses paleoplanos.

penneplanisadas e/ou nas quais a superfície do peneplano tenha sido destruída, têm poucas possibilidades de conter depósitos importantes. A Figura 8 mostra que praticamente todos os depósitos de caulim da

Figura 8: Mapa de isovalores de declividade da superfície da região de Campo Alegre. Notar que os depósitos de caulim estão todos em regiões com declividade < 10%.

região de Campo Alegre estão em locais onde a declividade é menor que 15%, corroborando o modelo genético proposto.

Mapa de favorabilidade A Tabela 1, montada conforme os critérios acima definidos, contém as informações (matriz A) necessárias ao cálculo dos pesos (ponderadores w_i) de cada um dos fatores diagnósticos. Usando a equação (2), os ponderadores calculados estão na Tabela 2.

A equação (1) foi alimentada com esses ponderadores para o cálculo do Índice de Favorabilidade de cada célula. A Figura 9 mostra o mapa de isovalores de favorabilidade obtidas por krigagem pontual dos valores de favorabilidade das células. Esse mapa, denominado Mapa de Favorabilidade, mostra como preferencial para ocorrência de depósitos de caulim uma faixa NS, paralela à borda leste da Bacia de Campo Alegre, e as regiões a sul e sudoeste da cidade de Campo Alegre. Deve-se notar que, embora seja boa a correspondência entre os

Tabela 1: Matriz de fatores diagnósticos usados para o cálculo dos ponderadores do índice de favorabilidade para caulim na região da Bacia de Campo Alegre (SC).

DEPÓSITO	FATOR DIAGNÓSTICO						
	Contido na faixa NS hidrotermalizada	Contido em sequência riolítica de cobertura	Contido em superfície de aplainamento entre 960 e 1060 m	Teor equivalente de K entre 3,04 e 4,00%	Fator F entre 10,22 e 15,47%	Contido em zona com declividade < 10%	Presença de ocorrência de caulim em superfície
Mina I-INCEPA	0	1	1	1	1	1	1
Turvo	0	1	1	0	1	1	1
Mina 3	0	1	1	1	1	1	1
Planalto Alegre	0	1	1	1	1	1	1
Ananã	1	1	1	1	1	1	1
Ananã (5A)	1	1	1	1	1	1	1
6-CERAMARTE	0	1	1	1	1	0	1
Mina 7	0	1	1	1	1	0	1
Mina 8	1	1	1	1	1	1	1
Mina 9	1	1	1	1	1	0	1
Mina 10-INCEPA	0	1	1	1	1	1	1
Cambuí	1	1	1	0	0	1	1
Floresta	1	1	1	0	0	1	1
Cavalheiro	0	1	1	1	0	0	1
Mina 14	1	1	1	1	1	1	1
15-CERAMARTE	1	1	1	1	1	1	1
16-CERAMARTE	1	1	1	1	1	1	1
Mina 17	1	1	1	1	1	1	1
Mina 18	1	1	1	1	1	1	1
Floresta Queijo	1	1	1	1	0	1	1
Kowalski	0	1	1	1	1	1	1
Germer-Rio Vermelho	0	1	1	1	0	1	1

Tabela 2: Ponderadores usados na equação (1) para o cálculo dos índices de favorabilidade. As variáveis são as mesmas da Tabela 1.

Variável	Ponderador (w_i)	Variável	Ponderador (w_i)
Faixa NS hidrotermalizada	0,2459	Fator F	0,3452
Sequência riolítica de Cobertura	0,4271	Declividade < 15%	0,3603
Superfície entre 960 e 1060 m	0,4271	Zona caulinizada	0,4271
Teor equivalente de K	0,3785		

locais das minas de caulim e as áreas de maior favorabilidade (índices maiores que 1,40, Figura 9), a maior parte das minas está próxima porém fora dessas áreas. A mina de Bateias, ao norte, é a única mina situada em zona tida como não favorável (índice menor que 0,80). Conforme comentado anteriormente, essa mina mostra evidências de ser de modelo diferente daquelas para as quais o Mapa de Favorabilidade foi calculado. Minas situadas em regiões com favorabilidades entre 0,80 e 1,40, a exemplo do conjunto Floresta – Cavalheiro e da mina Kowalski (Fig. 9), devem ser aquelas nas quais os processos supergênicos foram particularmente ativos, diminuindo

Figura 9: Mapa de Favorabilidade para caulim e ouro da região de Campo Alegre. Esse mapa foi traçado a partir dos Índices de Favorabilidade calculados para 14.500 células que recobrem toda a região.

ou mesmo eliminando a importância de fatores diagnósticos como aqueles derivados da aerocintilometria.

CONCLUSÕES A análise do processo genético dos depósitos de caulim da região de Campo Alegre permitiu identificar 7 fatores que, usados em conjunto, são diagnósticos da presença de depósitos desse tipo na Bacia. Esses fatores são: controle estrutural, proporcionado pelo sistema de falhas e intrusões NS, paralelo a borda leste da Bacia, controle litológico, presença de ocorrências de argilominerais, teores equivalentes de K, fator F, superfície de aplainamento entre 960 e 1060 m, e declividade menor que 10%. Esses fatores foram usados para o

cálculo dos índices de favorabilidade para caulim (e ouro) de 16.000 células que recobrem a região da Bacia de Campo Alegre. Os resultados, expressos em um mapa de favorabilidade, identificam como prioritárias uma faixa norte-sul, paralela a borda leste da Bacia, e as regiões a sul e sudoeste da cidade de Campo Alegre. Minas nas quais o processo mineralizador supergênico foi muito mais intenso que o hidrotermal (Floresta, Cavalheiro e Kowalski) não se situam em regiões de favorabilidade máxima. O mesmo acontece com a Mina de Bateias, nesse caso devido a este depósito ter sido gerado por processos diferentes daqueles das minas da região a sul de Campo Alegre, o que implica na existência de fatores diagnósticos diferentes.

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- Ab'Sáber A.N. & Bigarella J.J. 1961. Superfícies aplainadas do primeiro planalto do Paraná. *Boletim Paranaense de Geografia*, 4 e 5:117-125.
- Annels A.E. 1991. *Mineral Deposit Evaluation - A practical Approach*. Chapman & Hall (London), 436 p.
- Basei M.A.S. & Teixeira W. 1987. *Geocronologia do Pré-Cambriano/Eopaleozóico de Santa Catarina*. Texto explicativo do mapa geológico de Santa Catarina na escala 1:500.000. DNPM/SCTME(SC), 215p.
- Biondi J.C. 1998. Modelo genético dos depósitos de caulim Floresta, Cambuí, Turvo e Aruanã (SC-BR). Cong. Brasil. Geologia 40^o (Belo Horizonte), *Anais*, p.152.
- Biondi J.C. 1999. Geologia e gênese dos depósitos de caulim Floresta e Cambuí (Formação Campo Alegre - SC): 2. Petroquímica e modelo genético. *Revista Brasileira de Geociências*, 29(1):151-156.
- Biondi J.C., Furtado L.I. 1999. Geologia e gênese dos depósitos de caulim Floresta e Cambuí (Formação Campo Alegre - SC): 1. Faciologia e mineralogia das rochas e minérios. *Revista Brasileira de Geociências*, 29(1):141-150.
- Biondi J.C., Vanzela G.A., Bartoszek M.K.. 2000. Processos químicos de gênese de depósitos de argilominerais a partir de rochas vulcânicas da Formação Campo Alegre (SC). *Geochimica Brasiliensis* (no prelo), 30 p.
- Carr, J.R. 1995. *Numerical Analysis for the Geological Sciences*. Prentice Hall (New Jersey), 592 p.
- Citroni S.B. 1998. *Bacia de Campo Alegre (SC) - Aspectos petrológicos, estratigráficos e caracterização geotectônica*. Tese de Doutorado, Instituto de Geociências, Universidade de São Paulo, 185 p. (anexos e mapa).
- Citroni S.B. & Basei M.A.S. 1999. Estratigrafia e paleogeografia da região de Campo Alegre - SC. 1^o Simp. Sobre Vulcanismo e Ambientes Associados, Gramado, *Boletim de Resumos*, p.55.
- Daitx E.C. 1979. *Projeto Guaratubinha-Pien*. BRASIL.Convênio DNPM/CPRM. Relatório inédito, São Paulo, 184p.
- David M. 1988. *Handbook of Applied Advanced Geostatistical Ore Reserve Estimation*. Elsevier (N.Y.), 216 p.
- Ebert H. (1971) O Grupo Guaratubinha no norte do Estado de Santa Catarina. Cong. Brasil. Geol., 25, São Paulo, *Anais*, 2:153-157.
- Gnojek I. & Prichystal A. 1985. A new zinc mineralization detected by airborne gamma-ray spectrometry in northern Moravia (Czechoslovakia). *Geoexploration*, 23:491-502.
- Harff J., Davis J.C., Olea R.A. 1992. Quantitative assessment of mineral resources with an application to petroleum geology. *Nonrenewable Resources*, 1:74-84.
- Hedenquist J.W., Izawa E., Arribas A., White N.C. 1996. Epithermal gold deposits: Styles, characteristics and exploration. *The Society of Economic Resources (Japan)*, Spec. Publication nº 1, 15 p.
- Isaaks E.W. & Srivastava R.M. 1989. *Applied Geostatistics*. Oxford University Press (Oxford), 560 p.
- Journel R.A. & Huijbregts D.W. 1978. *Mining Geostatistics*. Academic Press (London), 606 p.
- McCammon R.B., Finch W.I., Kork J.O., Bridges N.J. 1994. An integrated data-directed numerical method for estimating the undiscovered mineral endowment in a region: *Nonrenewable Resources*, 3:109-122.
- Newman K.M., Casselman M.J., MacMillan W.J. 1995. Highland Valley porphyry copper deposits: A review and update with emphasis on the Valley Mine. In: T.G. Schroeter (edit.) "Porphyry Deposits on the Northwestern Cordillera of North America". Can. Inst. Min. Metall and Petroleum, Special Publication 46:161-191.
- Pan G. 1993. Regionalized favorability theory for information synthesis in mineral exploration. *Mathematical Geology*, 25:603-631.
- Pan G. & Porterfield B. 1995. Large-scale mineral potential estimation for blind precious metal ore bodies. *Nonrenewable Resources*, 6:187-207.
- Pires A.C.B. 1995. Identificação geofísica de áreas de alteração hidrotermal, Crixás-Guarinos, Goiás. *Revista Brasileira de Geociências*, 25(1):61-68.
- Saunders D.F., Burson K.R., Branch J.F., Thompson C.K. 1993. Relation of thorium normalized surface and aerial radiometric data to subsurface petroleum accumulations. *Geophysics*, 58:1417-1427.
- Silva L.C. 1987. *Textos Básicos de Geologia e Recursos Minerais de Santa Catarina*. Texto do mapa geológico de Santa Catarina na escala 1:500.000. DNPM/SCTME(SC), 215p.
- Wang Y., Tan B.T., Wang Y., Wu J. 1994. Information structure analysis for quantitative assessment of mineral resources and the discovery of silver deposit. *Nonrenewable Resources*, 4:284-294.
- Wellmer F.W. 1999. *Statistical Evaluations in Exploration for Mineral Deposits*. Elsevier (Amsterdam), 431 p.

Manuscrito A-1151

Recebido em 30 de março de 2000

Revisão dos autores em 28 de setembro de 2000

Revisão aceita em 10 de outubro de 2000