GEOBOTÂNICA POR SENSORES REMOTOS: UMA REVISÃO

WALDIR RENATO PARADELLA* e WILLIAM DAVID BRUCE**

ABSTRACT GEOBOTANICAL REMOTE SENSING: A REVIEW Recent advances in Remote Sensing technology have encouraged research toward the developments of new approaches to the application of the concept of Geobotany to geological mapping and resource exploration (mineral and hydrocarbon). The relationship between Geobotany and Remote Sensing is examined in this paper from a conceptual perspective. As a consequence of this, a basic distinction between Background Geobotany and Target Geobotany is established. The theoretical basis for this distinction, their practical interdependence, and their operational potencial as geological mapping and exploration tools are also analysed. The paper also provides a current update to recent bibliographic works on the subject of Geobotany and Remote Sensing.

RESUMO Avanços recentes na tecnologia de Sensoriamento Remoto têm propiciado o desenvolvimento de novas abordagens em Geobotânica aplicada à pesquisa mineral e ao mapeamento geológico. O inter-relacionamento entre estes dois campos de pesquisa é examinado neste trabalho dentro de um contexto conceitual. Como consequência, uma distinção entre Geobotânica de Reconhecimento e Geobotânica de Alvo é estabelecida. A fundamentação teórica desta distinção, sua interdependência e o potencial no que se refere às investigações geológicas são também enfocados. É apresentada ainda uma bibliografia atualizada sobre pesquisas em Geobotânica via sensoriamento remoto.

INTRODUÇÃO Mais de 60% da superfície emersa do planeta é coberta por vegetação, sendo quase 40% dominada por florestas (Woodell 1978). Face à demanda crescente por recursos não-renováveis, tais áreas têm recebido cada vez mais atenção em programas de prospecção mineral, particularmente considerando-se que regiões com baixa cobertura vegetal já atingem um potencial próximo ao máximo de exploração. Neste sentido, espera-se que as grandes descobertas em depósitos minerais venham de áreas de densa cobertura vegetal, ainda pouco exploradas (Canney 1969).

No Brasil, a situação não é diferente. A região Amazônica, ocupando quase a metade de seu território, é em grande parte, pouco conhecida e a concentração de recursos exploratórios na área de Carajás levou à descoberta de uma das mais expressivas anomalias minerais do planeta (Santos 1981, 1986). Como o intemperismo, a vegetação mascara a exposição de rochas e restringe a obtenção de informações diretas pelo geólogo. Isto tem reflexo imediato no custo da prospecção, largamente suportada por métodos indiretos de Geoquímica (sedimentos de corrente e solos) e Geofísica. Neste contexto, são ainda raros no país os trabalhos dirigidos ao estudo de como as mudanças na vegetação se relacionam com variações na geologia e possam servir de auxílio no mapeamento geológico ou na prospecção mineral.

Tendo em vista a tendência atual da retomada de aplicação de estudos geobotânicos por Sensoriamento Remoto (SR), o estado da arte é analisado neste trabalho dentro da perspectiva de mapeamento geológico e prospecção mineral. Pelo caráter introdutório do assunto, optou-se por uma abordagem conceitual com a discussão sucinta de exemplos.

GEOBOTÂNICA E BIOGEOQUÍMICA A utilização da vegetação como guia para prospecção envolve não apenas a resposta da planta ao ambiente mas também dois campos de pesquisa distintos – a Geobotânica e a Biogeoquímica. Tradicionalmente, a Geobotânica tem sido entendida como a análise visual da vegetação na paisagem na busca de evidências de anomalias indicativas de mineralização. Já a Biogeoquímica estaria ligada ao uso de dosagens de concentração de metais no vegetal (Brooks 1972, 1983). Deste modo, a detecção de uma concentração mineral pela Geobotânica ou Biogeoquímica

ca é baseada fundamentalmente em princípio simples. O sistema radicular do vegetal, em contato com soluções no solo, agiria como um mecanismo de amostragem, fornecendo informações sobre características composicionais do substrato, eventualmente da presença da anomalia mineral. Tal mecanismo induziria concentrações de metais em partes específicas do vegetal ou resultaria em anomalia geobotânica (Fig. 1)

Figura 1 – Ilustração simplificada dos conceitos de Geobotânica e Biogeoquímica

Figure 1 – Simplified illustration of the Geobotany and Biogeochemistry concepts

* Instituto de Pesquisas Espaciais (Inpe), Av. dos Astronautas, 1758, Caixa Postal 515, CEP 12201, São José dos Campos, SP, Brasil

** Canadá Centre for Remote Sensing (CCRS), 1547 Merivale Road, Ottawa/Ontario, K1A 0Y7, Canadá

ANOMALIAS GEOBOTÂNICAS Como se definiu, a prospecção geobotânica requer apenas o "sensor" olho humano na procura de diferenças na vegetação que possam indicar mineralizações. Na prática, porém, tal método de fácil aplicação é um dos mais difíceis de se interpretar, posto que depende de conhecimentos multidisciplinares de Botânica, Ecologia, Geologia, Biogeoquímica e Fisiologia Vegetal. Sua utilização, como ferramenta auxiliar em prospecção mineral, remonta desde o século XVI, pela procura de plantas indicadoras de mineralizações de Cu e Zn (Malyuga 1964).

O conceito de abordagem tem, entretanto, mudado com o tempo. Karpinski, em 1841, teria sido o primeiro geólogo a reconhecer que diferenças em plantas podem ser indicadoras de variações na litologia (Brooks 1972). Nesta linha de raciocínio, é válido admitir, portanto, que plantas ou associações vegetais possam ser usadas para caracterizar a geologia de uma área. Deve ser considerado, entretanto, que outros fatores, não relacionados diretamente com a geologia, influem consideravelmente na distribuição, no crescimento e na sanidade dos vegetais (quantidade de radiação solar, precipitação, altitude, latitude etc.). Apesar disso, de modo até intuitivo, geólogos têm usado a distribuição de espécies vegetais e inter-relações entre comunidades como suporte ao mapeamento de unidades litológicas, como também na pesquisa de depósitos minerais (até hidrocarbonetos) e água subterrânea (Cannon 1971).

A caracterização de anomalias geobotânicas está baseada: 1. no estudo da natureza e distribuição espacial de comunidades indicadoras; 2. no estudo da natureza e distribuição de plantas indicadoras; e 3. no reconhecimento de mudanças morfológicas, fisiológicas e mutações nos vegetais (Brooks 1972). Outros autores (Mouat 1982, Goetz *et al.* 1983, Horler 1985) têm apresentado diferentes classificações e manifestações de efeitos em vegetais, derivados da proposição de Brooks (1972).

COMUNIDADES INDICADORAS Comunidades indicadoras ou floras características não indicam necessariamente mineralizações, mas podem ser usadas na caracterização de ambientes ou regiões nas quais mineralizações possam ocorrer. Exemplos do uso de comunidades indicadoras seriam aquelas compostas pelas floras halófitas, uma associação característica de vegetais de solos salinos que tem sido usada como guia na pesquisa de água subterrânea (Chiskishev 1965); floras de selênio, usadas na detecção de minerais radioativos (Cannon 1960); floras serpentinífticas, na pesquisa de cromita (Lyon *et al.* 1970); e floras características de ambientes ricos em Ca, tais como, solos desenvolvidos em calcários e dolomitos (Cannon 1971).

PLANTAS INDICADORAS Plantas indicadoras apresentam vantagens sobre comunidades indicadoras, pois possibilitam a detecção de mineralizações com maior grau de confiabilidade. Segundo Cannon (1971), plantas indicadoras de depósitos minerais podem ser espécies que se adaptaram a viver exclusivamente de rochas e solos que as suprem de quantidades não-usuais de um elemento particular ou que adquiriram uma imunidade a grandes quantidades de um metal específico, sendo capazes de rejeitá-lo; ou podem ser espécies de larga distribuição que indicam mineralizações, sob certas condições locais, devido a mudanças em acidez (pH), água e nutrientes. Como plantas indicadoras têm sido estudadas há muito tempo, uma listagem das principais estaria além do escopo deste artigo introdutório. Cannon (1971) e Brooks (1972) discutem em profundidade esse assunto e apresentam classificações das principais plantas indicadoras.

MUDANÇAS MORFOLÓGICAS, FISIOLÓGICAS E MUTAÇÕES O excesso ou a deficiência em elementos no solo pode originar uma variedade de mudanças morfológi-

cas, fisiológicas e mutações nos vegetais, visíveis a olho nu. Dentre as formas mais comuns de mudanças morfológicas-fisiológicas relacionadas a mineralizações incluem-se: clorose (amarelecimento das folhas); nanismo; gigantismo; frutos com formatos anômalos; variações na época de floração; senescência etc.

De toda essa discussão, fica evidente que o uso de Geobotânica na investigação geológica e prospecção mineral, incluindo hidrocarbonetos, é tarefa complexa, sendo fundamental o domínio e a integração de conhecimentos de áreas distintas como Geologia, Botânica e Ecologia para identificar, com consistência, o que é anormal no contexto normal da paisagem e extrapolar seu significado em termos da aplicação geológica. Outra dificuldade na aplicação de Geobotânica é que a abordagem, para ter maior probabilidade de sucesso, requer verificações de campo em estações específicas do ano. Finalmente, os resultados de pesquisas têm enfatizado o fato de que dados obtidos dessas investigações não são necessariamente aplicáveis de modo generalizado e, sim, de significado local. Isto torna a pesquisa e a aplicação da Geobotânica particularmente difícil, à medida que o observador dispõe somente da escala de observação ao nível do vegetal ou da paisagem, contando apenas com a subjetividade da visão humana para a detecção de anomalias que nem sempre são evidentes. Cole (1971) discute vários exemplos nos quais a aplicação de Geobotânica foi bem sucedida e outros, não. Segundo esta autora, um claro entendimento dos fatores ambientais é fundamental para o sucesso da abordagem. Isso incluiria os efeitos inter-relacionados de Geomorfologia, Clima, Pedologia, Geologia, relação solo/água etc. Para ambientes de florestas tropicais, dificuldades de acesso e de identificação de espécies requerem um prévio reconhecimento por aeronaves em baixa altitude, sendo o relevo em áreas montanhosas um dos principais fatores para variações de espécies.

SENSORIAMENTO REMOTO E GEOBOTÂNICA O advento de programas de Sensoriamento Remoto forneceu um novo impulso às investigações geobotânicas devido a vários fatores. Primeiro, pela ampliação da capacidade de observação das propriedades da vegetação, fora da faixa do visível no espectro eletromagnético. Segundo, pela visão sinóptica inerente aos produtos sensores, que permitiu a análise de padrões de cobertura vegetal de extensas áreas, onde inter-relacionamentos entre comunidades e entre ecossistemas puderam ser examinados espacialmente. Finalmente, devido à repetitividade de recobrimento da maioria dos sensores operacionais, tornou-se viável o monitoramento da fenologia [no contexto de sensoriamento remoto, denota os aspectos do dossel foliar das plantas em seus diferentes estágios vegetativos (senescência, brotação, florescimento etc.)] da cobertura vegetal, aumentando sobremaneira a possibilidade de detecção e discriminação de diferenças nas comunidades vegetais.

Uma variedade de equipamentos sensores fornece dados com diferentes resoluções espaciais e espectrais. Do mesmo modo, anomalias geobotânicas se manifestam em diferentes escalas. Alguns tipos de anomalias são sutis e/ou sazonais em sua expressão e requerem, para sua detecção, sensores de elevada resolução espacial/espectral e amostragens multissazonais. O desafio da aplicação de conceitos geobotânicos pelo Sensoriamento Remoto em Geologia está na escolha ou adaptação de seus dados à manifestação geobotânica perseguida.

De modo geral, com sensores de baixa a moderada resolução espectral/espacial, como os do Landsat e SPOT (ver detalhes sobre esses programas em Slater 1980, Paradella & Vitorello 1982), é possível a detecção de anomalias geobotânicas expressas pelas mudanças fisionômicas – variações na estrutura de comunidades (diferenças de densidade de cobertura) e taxonômicas – mudanças na flora ou na distribuição de espécies (presença ou ausência de certos tipos de espécies). Mais raramente é possível a detecção de variações fisionômi-

cas ligadas à morfologia de indivíduos (gigantismo ou nanismo) ou à fenologia (floração, frutificação etc.). Milton & Mouat (1984) discutem com mais detalhes este assunto.

Essas anomalias, detectáveis ao nível orbital, ocorrem em áreas extensas, estando normalmente relacionadas com a resposta da comunidade de vegetais às variações de condições ambientais, particularmente às características físicas do terreno (profundidade do *bedrock*, textura do solo, conteúdo de umidade, elevação, declividade etc.). A resposta do vegetal às variações químicas do solo/rocha resulta normalmente em variações estruturais de características morfológicas e/ou fisiológicas manifestadas espectralmente de forma sutil. Tais padrões espectrais são passíveis de detecção, normalmente com sensores de elevada resolução espectral/espacial. Em outras palavras, a detecção direta de estresse em vegetação, induzido geoquimicamente, requer o uso de imageadores em aeronaves e espectrorradiômetros que operam em aeronaves, no campo ou em laboratório.

Dentro da realidade brasileira, a disponibilidade atual de dados orbitais restringe as abordagens geobotânicas à exploração de fatores litológicos/mineralógicos/estruturais que afetam a comunidade como um conjunto, isto é, estudos de caráter regional baseados mais em respostas espectrais de comunidades do que em indivíduos isoladamente.

GEBOTÂNICA DE RECONHECIMENTO *Background Geobotany*) O conceito de Geobotânica de Reconhecimento ou Regional ou de *Background* (Bruce & Singhroy 1984, Hornsby & Bruce 1986, Bruce & Hornsby 1987) está intrinsecamente mais ligado à investigação no âmbito de comunidades que de espécies. Como consequência, não requer o uso de sensores especiais e foi elaborado tendo em vista as limitações operacionais em sistemas sensores atualmente disponíveis, isto é, apóia-se basicamente no uso de dados orbitais (MSS e TM/Landsat e XS/SPOT). Ele está baseado na hipótese de a natureza e a distribuição de comunidades vegetais ocorrerem como resultado de condições ambientais, nas quais o componente geológico exerce seu peso. Neste sentido, variações na distribuição de uma norma estabelecida de uma área pode ser indicativa de mudanças na geologia. O conceito é ilustrado na figura 2.

O modelo se baseia na detecção de padrões espectrais em imagens de Sensoriamento Remoto que se relacionam com diferentes classes ecológicas ou biofísicas no terreno. Neste contexto, o termo classe biofísica se refere à integração de aspectos da fisiografia e vegetação no controle da resposta detectada. Tais padrões representariam a resposta em energia eletromagnética às diferenças entre comunidades vegetais, diretamente ligadas a mudanças nos atributos da paisagem (clima, relevo, solo, litologia/estrutura etc.). Regionalmente, o componente geológico exerceria controle primário na distribuição das classes detectadas e, dessa forma, pelo Sensoriamento Remoto, seria possível, em diferentes níveis, inferir propriedades do substrato.

Em virtude de sua baixa (MSS/Landsat) a moderada (TM/Landsat, XS/SPOT) resolução, imagens de satélite são basicamente ferramentas de reconhecimento para o geólogo. Isso implica que, em muitas investigações, a utilização da Geobotânica pode ser indireta ou mesmo subconsciente, quer no mapeamento de litologias quer no de estruturas. Um fotointérprete pode mapear feições geológicas devido às associações com padrões de vegetação sem dispor, *a priori*, de qualquer conhecimento do terreno e de sua cobertura vegetal, ou mesmo desconhecer que está mapeando resposta espectral ligada à vegetação. A prática tem mostrado que esse tipo empírico de abordagem é limitado em termos de sucesso na investigação.

O modelo de Geobotânica de Reconhecimento requer um entendimento mínimo dos vários fatores que influem na distribuição da vegetação e em suas diferenças estruturais e,

conseqüentemente, na resposta espectral detectada. Tal entendimento é crucial na abordagem, fornecendo subsídios lógicos para o entendimento das relações geológicas com a vegetação, pelos padrões espectrais na cena e detecção de variações e anomalias, no contraste com o normal ou *background*. Identificar áreas anômalas na prática requer um detalhado conhecimento das condições gerais do terreno. Esta noção de *background* é fundamental não apenas como meio de seleção de áreas anômalas para pesquisa de detalhe, mas principalmente como fonte de informação da presença de diferentes padrões regionais, os quais são básicos na modelagem de evolução geológica e de prospecção mineral.

Figura 2 – O conceito de Geobotânica de Reconhecimento: 1. rochas do cristalino; 2. mineralização ao longo de falha; 3. rochas sedimentares; 4. solo; 5. comunidade vegetal sobre rochas sedimentares; 6. mudanças morfológicas/fisiológicas na vegetação; 7. comunidade vegetal sobre rochas do cristalino (Adaptado de Bruce & Hornsby 1987)

Figure 2 – The concept of Background Geobotany: 1. crystalline rocks; 2. mineralization along fault; 3. sedimentary rocks; 4. soil; 5. vegetal community on sedimentary rocks; 6. morphology/physiology changes in vegetation; 7. vegetal community on crystalline rocks (Adapted from Bruce & Hornsby 1987)

Na literatura com dados MSS/Landsat, Stringer *et al.* (1975) foram precursores no uso de classificações de vegetação em mapeamento geológico e prospecção mineral. Singhroy & Bruce (1977) utilizaram pela primeira vez o conceito de mapas biofísicos como instrumento básico para o estabelecimento de relações geológicas regionais. Tal conceito foi também utilizado por Ringrose *et al.* (1981) em aplicações de Geologia de Engenharia e prospecção mineral. Outro interessante exemplo de aplicação foi apresentado por Bonham-Carter & Rencz (1982) ao utilizar valores de *pixels* em imagens MSS, não mascarados por coberturas glaciais, em classificações temáticas do substrato litológico. Variações na densidade de cobertura e no tipo de associação vegetal seriam fatores controladores das diferentes respostas detectadas. Cibula (1982) utilizou dados multissazonais MSS-Landsat na pesquisa de fontes de cascalheiras para uso em construção

civil. Imagens da estação úmida forneceram excelente separação de ecossistemas. Imagens da época seca permitiram boa discriminação entre litologias na área, bem como a detecção de comunidades vegetais sujeitas a estresse hídrico devido à menor capacidade de retenção de água dos solos com cascalhos. No semi-árido do Nordeste brasileiro, Paradella (1983) utilizou dados multissazonais na discriminação de várias unidades litológicas pelos controles geobotânicos e variações pedológicas.

O advento do TM/Landsat marca uma nova etapa nas aplicações de Geobotânica de Reconhecimento. Em face da melhor resolução espacial/espectral, detalhes do terreno puderam ser examinados e explorados no contexto geológico. Assim, Green *et al.* (1985) enfatizaram a importância de se considerar os aspectos da estrutura da cobertura (*dossel*) no controle da resposta espectral de associações vegetais vinculadas a diferenças litológicas (Fig. 3).

Prince & Birnie (1985) e Defeo *et al.* (1986) analisaram as correlações existentes entre dados botânicos, topográficos, geológicos e espectrais de ambientes sedimentares. Suas conclusões reforçam o papel da Geologia (litologia e estrutura) no condicionamento de atributos do relevo e da cobertura vegetal. Controlando expressões geomórficas, a geologia produz diferentes ambientes com variações de incidência de radiação solar, disponibilidade de água e nutrientes, os quais controlam diferentes comunidades vegetais. Tais comunidades produzem distintos padrões de radiação nas imagens TM/Landsat, pos-

sibilitando o mapeamento indireto das diferentes unidades litológicas (Fig. 4)

A constatação de que variáveis geomorfométricas – como elevação (altitude), declividade (primeira derivada vertical da elevação), aspecto (primeira derivada horizontal da elevação ou direção da declividade), convexidade (segunda derivada da elevação ou a taxa de mudança da declividade) etc. – são atributos quantificáveis do terreno, os quais, portanto, exercem controle na distribuição da cobertura vegetal, tem levado à integração de dados de Sensoriamento Remoto com DEM (*Digital Elevation Models*). Franklin *et al.* (1988) apresentaram resultados de melhoria da acurácia na classificação de classes de paisagem pelo uso integrado de dados co-registrados TM/Landsat (bandas refletidas) e DEM (bandas representando elevação, aspecto, convexidade, declividade). Hornsby *et al.* (1988) utilizaram pela primeira vez comparações entre classes temáticas (biofísicas) obtidas de dados TM/Landsat e DEM (elevação, declividade e aspecto) em exploração geológica e seleção de áreas de potencialidade mineral. Uma extensão dessa abordagem, que integra conceitos de Sistema Especialista e Geobotânica, foi usada por Hornsby & Bruce (1988) na indicação de áreas-fontes em agregados para construção civil em região de densa cobertura vegetal no Escudo Canadense.

O uso de Sensoriamento Remoto com DEM, na definição de classes biofísicas na exploração geológica e prospecção mineral, caracteriza a fase atual ou o estado da arte em Geobo-

Figura 3 – Resposta espectral (bandas 4, 5 e 7 do TM-Landsat) e relação com o perfil do dossel, sombreamento e substrato: 1. ambiente mais seco/rochas cristalinas/dossel com topo plano; 2. ambiente mais úmido/rochas sedimentares/dossel irregular com sombreamentos; 3. clareiras naturais/ausência de biomassa (Adaptado de Green *et al.* 1985)

Figure 3 – Spectral response (TM-Landsat bands 4, 5 and 7) and the relationship among canopy cross-section, shadowing, and substratum: 1. drier environment/crystalline rocks/flat-topped canopy; 2. wetter environment/sedimentary rocks/irregular canopy top with shadowing; 3. natural clearings/absence of biomass (Adapted from Green *et al.* 1985)

Figura 4 – Perfil generalizado que mostra a relação entre litologia, relevo e comunidade vegetal. Legenda: 1, 2, 3 e 4 representam diferentes ambientes morfoclimáticos com específicas associações de espécies arbóreas controladas pelo relevo e litologia (Adaptado de Price et al. 1985)

Figure 4 – Generalized profile showing the relationship among lithology, relief, and vegetal community. Legend: 1, 2, 3 and 4 represent different morphoclimatic environments with specific associations of arboreal species controlled by relief and lithology (Adapted from Price et al. 1985)

tânica de Reconhecimento. A figura 5 resume esta tendência por meio dos principais fatores controladores em Geobotânica de Reconhecimento, que influenciam na distribuição dos padrões espectrais em imagens de Sensoriamento Remoto, seja ao nível isolado do *pixel*, seja nas relações de contexto entre *pixels* na cena.

GEOBOTÂNICA DE ALVO (Target Geobotany). As discussões anteriores enfocaram o uso da resposta espectral da vegetação, basicamente em mapeamento geológico, a partir de sensores de baixa a moderada resolução espectral (com os

satélites de recursos naturais atualmente em operação, a melhor resolução espectral é de 50 nm com a banda 2 do TM/Landsat). Em prospecção mineral, é também desejável que se possa inferir, via Sensoriamento Remoto, variações nas propriedades químicas do substrato.

A Geobotânica de Alvo (*Target/Spectral Geobotany*), ou a detecção espectral e estresse geoquímico em vegetação, é um campo também recente de pesquisa que se baseia no uso de sensores de elevada resolução espectral/espacial. A detecção direta de um vegetal sob estresse geoquímico implica o entendimento dos mecanismos que controlam isoladamente a resposta espectral do vegetal em relação à anomalia geoquímica no solo e como esta resposta pode ser detectada espectralmente.

A BOTÂNICA DO ESTRESSE Goetz et al. (1983) e Chang & Collins (1983) discutem com detalhes os aspectos botânicos do estresse geoquímico. A figura 6 ilustra o modelo proposto por Horler (1985), em que processos geoquímicos e biológicos combinados resultam em anomalias geobotânicas e/ou biogeoquímicas.

Os processos geoquímicos que resultam em dispersão secundária de elementos, a partir do corpo de minério, são em grande parte controlados pelas propriedades de pH e Eh dos solos (Rose et al. 1979). Os elementos de minerais do solo são extraídos pelas plantas na forma iônica (Horler 1985). O processo de extração pode ser entendido como um somatório de fases que envolvem o movimento de íons do interior para a superfície dos minerais do solo, absorções por soluções ou mesmo a partir da fase sólida do solo, com a entrada no vegetal através das membranas das células da raiz por mecanismos passivos e ativos (seletivos) e migração para outras partes do vegetal (Malyuga 1964). Este ciclo é mantido por interações internas na planta com barreiras controladoras da movimentação iônica. A entrada de macro e da maioria de micronutrientes ocorre em condições reguladas, que tendem a permanecer

Figura 5 – A Geobotânica de Reconhecimento e seus principais fatores controladores
Figure 5 – The Background Geobotany and its main control factors

Figura 6 – As diferentes etapas no processo de Geobotânica de Alvo (Fonte: Horler 1985)

Figure 6 – The different phases in the Target Geobotany process (Adapted from Horler 1985)

constantes (equilíbrio homeostático). Vários mecanismos atuam neste controle, os quais também têm seus limites e, no geral, a extração de micronutrientes e de metais pesados, na forma iônica, é muito menos controlada que a dos maiores macronutrientes.

Em Geobotânica de Alvo, o interesse maior concentra-se nos limites da homeostase, na qual estresses começam a ocorrer devido ou à toxidez, ou à deficiência de elementos. A figura 7 ilustra este processo.

Figura 7 – A resposta do vegetal à disponibilidade de um dado elemento (Fonte: Horler 1985)

Figure 7 – The vegetal response to the supply of an element (Source: Horler 1985)

A fase de homeostase no vegetal ocorre no patamar horizontal do gráfico, em que pouca ou nenhuma mudança ocorre, induzida por variações na concentração de um dado elemento. Tal fato leva a fatores de propensão ao estresse, dependentes das condições ambientais. Horler (1985) discute com detalhes os fatores incipientes de estresse, que ocasionam anomalias geobotânicas em ambientes ácidos, alcalinos e redutores.

Em muitos casos, a presença de anomalias geoquímicas resultam em alterações gerais na disponibilidade de nutrientes no solo para o pleno desenvolvimento vegetal. Tais alterações podem acarretar uma maior necessidade de água, de tal forma que a vegetação geoquimicamente estressada pode exibir sintomas de estresse hídrico. Em outros casos, concentrações elevadas de certos cátions no solo, como Ca^{++} , Mg^{++} , Cu^{++} , Zn^{++} etc., vão gerar, na realidade, sintomas de deficiência em vegetais. Isso resulta basicamente na inibição de competição entre íons na zona da raiz, onde um íon compete com o outro no processo de extração e utilização pelo vegetal. A inibição é comum entre pares de cátions com Ca^{++} e Mg^{++} ; Mn^{++} e Ca^{++} ; e Fe^{++} e Ca^{++} . O fenômeno da clorose ocorre devido ao decréscimo do conteúdo de clorofila. Uma das causas da clorose é a deficiência em Fe^{++} , importante na síntese da clorofila. Tal deficiência pode estar ligada a elevados teores de Ca^{++} no solo.

Neste contexto, o Ca^{++} apresenta um papel importante na nutrição e estresse em vegetal. A deficiência em Ca^{++} resulta a perda gradativa da permeabilidade seletiva do sistema de membrana celular do vegetal, com grande influência no processo de extração e transporte de água e íons. Como consequência da perda de permeabilidade seletiva, a baixa concentração de Ca^{++} no solo leva ao aumento do teor de uma variedade de íons em partes distintas do vegetal (folha, caule, raiz), tais como Zn, Cu, Mn, Fe, Al e Mo. Em outras palavras, a toxidez seria na realidade um reflexo da deficiência de Ca^{++} no solo. Detalhes sobre sintomas de deficiência em macro e micronutrientes e características de respostas de vegetais sob condições de estresses geoquímicos podem ser encontrados em Bidwell (1979) e Goetz *et al.* (1983).

Cabe, por último, destacar que na abordagem de Geobotânica de Alvo está implícita a presença de anomalia geoquímica na zona da raiz do vegetal para que a anomalia geobotânica ocorra. A presença de anomalia biogeoquímica indica obviamente a possibilidade da anomalia geobotânica, porém sua ausência não descarta a ocorrência de anomalia geobotânica. Labovitz *et al.* (1983) encontraram correlações entre valores de reflectância de vegetação com análises geoquímicas do solo, na ausência de correlações com valores biogeoquímicos. Isso pode indicar que concentrações anômalas de metais no solo podem produzir variações na proporção de clorofila e água na folha, em necessariamente ocorrer concentrações de metais em partes do vegetal. Em outras palavras, em algumas situações, a Geobotânica via Sensoriamento Remoto pode ser mais adequada a Biogeoquímica.

A DETECÇÃO DO ESTRESSE A região do espectro eletromagnético entre 0,4 e 2,5 μm (visível ao infravermelho refletido) cobre os intervalos dos espectro mais comumente explorados por Sensoriamento Remoto. Neste intervalo, o espectro típico de reflectância de uma folha fotossinteticamente ativa pode ser dividido entre três regiões (Tucker 1978): 1. a dominada por absorções de pigmentos da planta (de 0,4 a 0,65 μm); 2. a controlada pela estrutura interna foliar (de 0,76 a 1,0 μm); e 3. a relacionada a processos de absorção pela água (de 1,35 a 2,5 μm). A figura 8 mostra a localização dos principais controles de reflectância em um espectro típico de folha verde. Salienta-se que a resposta de uma copa foliar é inferior ao padrão apresentado. Fatores como a orientação das folhas, sombreamentos, espaços vazios etc., contribuem para decrescer a resposta espectral, que pode chegar a valores de 40% a 70% para o visível e infravermelho próximo, respectivamente (Knipling 1970). O intervalo marcado pela inclinação do es-

Figura 8 – Espectro típico de folha verde com regiões controladas por: 1. pigmentos; 2. estrutura interna foliar; e 3. conteúdo de água foliar

Figure 8 – Typical spectrum of a green leaf with regions controlled by: 1. pigments; 2. internal cellular structure; and 3. leaf water content

pectro entre 0,68 μm e o início do platô do infravermelho próximo a 0,75 μm é denominado borda-vermelha (Horler *et al.* 1980) e sua variação (inclinação e deslocamento) tem sido relacionada a diferenças de concentrações de pigmentos de clorofila na folha (Horler *et al.* 1983, Chang & Collins 1983).

A discussão a seguir procura enfocar o estado da arte em Geobotânica de Alvo, segundo diferentes abordagens.

De Laboratório Press & Norman (1972) publicaram um dos primeiros resultados de experimentos com vegetais crescendo em ambientes isolados e submetidos a sais de Pb ou Zn. Foi observado um aumento na resposta de reflectância espectral das plantas estressadas na região de 550 nm, mas pouca ou nenhuma mudança na região de 700 a 990 nm do espectro, interpretadas como ligadas à deficiência em clorofila nas folhas, a qual reduz a absorção da radiação no visível. Horler *et al.* (1980) realizaram experimentos com vários tipos de vegetais em soluções nutritivas com Cd, Cu, Pb ou Zn. Foi constatado um progressivo aumento na reflectância das folhas, na região visível do espectro (475, 550 e 660 nm) e um progressivo decréscimo no infravermelho próximo/médio (850, 1.600 e 2.200 nm). Seus resultados para a região do visível seriam consistentes com um decréscimo na concentração de clorofila nas folhas estressadas, ao passo que, para o infravermelho próximo, foram aventadas mudanças na estrutura interna foliar.

Chang & Collins (1980) estudaram os efeitos tóxicos em vegetais submetidos a soluções com metais pesados (Cu, Zn, e Ni). Uma forte correlação foi observada entre o aumento da resposta no visível (550-760 nm) e o decréscimo de concentração de clorofila nas folhas. Em adição, foram também detectados decréscimos de resposta no infravermelho próximo e pequenas variações na região de 400 a 500 nm, as quais estariam ligadas a variações nos teores de clorofila a e b.

Horler *et al.* (1983) analisaram detalhadamente o espectro da borda-vermelha e estabeleceram com consistência a dependência de sua variação (inclinação e deslocamento) com teor em clorofila na folha. Basicamente, à medida que esse teor aumenta, ocorre um deslocamento espectral ou mudança na forma do espectro em direção à região dos maiores comprimentos de onda (efeito *red-shift*) e vice-versa, sob condições de estresse (efeito *blue-shift*). A posição da borda-vermelha no espectro vegetal torna-se assim um indicador confiável da quantidade de clorofila e, diretamente, da detecção de estresse geoquímico. Tal deslocamento seria resultado de duas propriedades ópticas especiais do tecido da planta: 1. absorção de energia pela clorofila dando baixa reflectância na região do

vermelho do espectro e 2. elevado espalhamento interno foliar associado à ausência de bandas de absorção de pigmentos e água, causando elevada resposta no infravermelho próximo. Chang & Collins (1983) encontraram valores de 7 a 10 nm de deslocamento da borda-vermelha para vegetais com estresses geoquímicos. Isto implica a necessidade de sensores de elevada resolução espectral para detectar essas variações (na ordem de 1 a 5 nm seria desejável).

Em síntese, a resposta da vegetação sob estresse geoquímico, baseada em dados experimentais de laboratório, pode ser caracterizada por: 1. aumento da reflectância em 550 nm (pico do verde); 2. aumento da reflectância a 680 nm (região de absorção de clorofila); 3. efeito *blue-shift* da borda-vermelha (região de 680 a 800 nm); e 4. decréscimo da resposta na região do *plateau* do infravermelho (750 a 1.350 nm). Desses efeitos, o mais sintomático do estresse seria o *blue-shift*. A figura 9 exemplifica toda a discussão anterior, que é, em síntese, a base sobre a qual se desenvolveu o conceito de Geobotânica de Alvo.

Figura 9 – O conceito de Geobotânica de Alvo: 1. reflectância de folha submetida a estresse geoquímico; 2. reflectância de folha normal; e 3. borda vermelha e efeito *blue-shift* induzido por estresse geoquímico (Fonte: Bruce & Hornsby 1987)

Figure 9 – The Target Geobotany concept: 1. leaf reflectance under geochemical stress; 2. normal leaf reflectance; 3. red-edge/blue shift induced by geochemical stress (Source: Bruce & Hornsby 1987)

De Campo Um grande número de espectros de vegetais tem sido coletado em campo envolvendo uma diversidade de ambientes com mineralizações (Canney *et al.* 1970, Yost & Wenderoth 1971, Howard *et al.* 1971, Press 1974, Lyon 1975, Labovitz *et al.* 1983, Hare *et al.* 1984 a, b, Singhroy 1985). Tais trabalhos, no geral, indicam valores de reflectância mais elevados para a parte do visível do espectro vegetal sendo ainda controvertida a definição de uma tendência para o infravermelho próximo. Estudos de respostas ligadas à vegetação sobre depósitos de Cu mostraram que os valores obtidos nas faixas espectrais correspondentes às bandas TM 3 e 5 foram estatisticamente mais elevadas que os das encaixantes (Labovitz *et al.* 1983). A tentativa de se detectar no campo respostas similares de estresses de laboratório (*blue-shift*) foi bem sucedida nos trabalhos de Singhroy (1985) e Hare *et al.* (1984a). Contudo, este último autor também encontrou manifestações de *red-shift* em vegetais crescendo sobre zonas mineralizadas em Cu (Hare *et al.* 1984b).

De Aeronave Para amostragens representativas da copa foliar, são necessários dados coletados por helicópteros ou aeronaves. Rock (1984), utilizando dados espectrais obtidos de imageador que simula o TM Landsat, foi bem sucedido na detecção de anomalias geobotânicas em florestas decíduas associadas a microexudações de hidrocarbonetos. Schwaller & Track (1986), com o mesmo tipo de imageador, detectaram anomalias em vegetação que exibiam queda prematura de folhas em floresta decídua ligada a estresse induzido geoi-

micamente por Cu. Collins *et al.* (1983) e Milton *et al.* (1983) detectaram zonas mineralizadas sob densa cobertura vegetal (florestas temperadas) por medidas de *blue-shift* com espectrorradiômetro de elevada resolução espectral (512 bandas com 1,4 nm de largura cada). O sensor utilizado fornece perfis espectrais (radiância vs. comprimento de onda) e requer o uso de técnicas especiais de tratamento de dados pela análise da forma dos espectros por polinômios. É oportuno um comentário sobre esses resultados. Apesar da monotonia da cobertura vegetal, com quase ausência de variações em espécies, inegavelmente a detecção de estresses do tipo *blue-shift* por aeronaves representou um marco em pesquisa geobotânica. A tentativa de se obter as mesmas respostas em imagens tem mostrado resultados controversos. As conclusões das pesquisas com o imageador MEIS (Multi-detector Electro-optical Imaging Sensor) do CCRS são ainda preliminares para permitir generalizações. Singhroy *et al.* (1986) apresentaram evidências de detecção de *blue-shift* em três diferentes áreas mineralizadas em Cu-Zn-Pb. Já Rencz *et al.* (1986), analisando imagens sobre anomalias de Ba, Y, Nb e Ce, concluem pela impossibilidade de detecção de estresse devido à influência que variações entre espécies, diferenças de idades, indivíduos, dosséis etc. causam nas imagens. Miller *et al.* (1988) apresentaram resultados preliminares do uso do MEIS na detecção de estresses em vegetais induzidos artificialmente por injeções de soluções de Ni, Cu e As. A análise do espectro da borda-vermelha nas imagens mostrou efeitos *blue-shift* em apenas alguns espécimes com elevado nível de As. Desses resultados, fica claro que são necessários esforços adicionais em pesquisa para separar a informação (anomalia) das várias fontes de ruídos em imagens de elevada resolução. Neste contexto, restrições como variações entre composições de espécies, idade e cobertura são fatores limitantes na tentativa de se operacionalizar a detecção direta de estresses do tipo *blue-shift*. Deve-se considerar ainda a influência do processo de adaptação natural da vegetação às condições anômalas do ambiente, tornando-se às vezes improváveis respostas do tipo *blue-shift* devido somente aos elevados teores de metais no solo. Tais respostas podem ser esperadas sob circunstâncias em que fatores adicionais de estresses (deficiência em água, senescência etc.) possam induzir mudanças espectrais em vegetais previamente submetidos a estresses geoquímicos (Miller *et al.* 1988).

Orbital Dados digitais como os do MSS e TM/Landsat e XS/SPOT são obviamente de muito mais baixa resolução espectral; impraticáveis na detecção de estresses do tipo *blue-shift*. Contudo, sob determinadas condições, basicamente quando a expressão da anomalia em face do *background* ocorre em escala condizente com a baixa resolução destes sistemas, é possível a detecção de anomalias geobotânicas ligadas a mineralizações. Com mais de uma década e meia de recobrimentos sucessivos da superfície do planeta, é natural que vários exemplos bem-sucedidos desta abordagem possam ser encontrados na literatura.

Assim, imagens digitais MSS-Landsat foram usadas com sucesso na detecção direta de anomalias geobotânicas induzidas por Mo (Lyon 1975); Cu (Bolviken *et al.* 1977); Ni (Taranik *et al.* 1978); Li-As-Sn (Lefreve 1980); atividades geotermiais (Camacho *et al.* 1982); e metais básicos (Belanger & Rencz 1983). Outras abordagens têm incluído o uso de imagens multitemporais e/ou multissazonais, explorando a fenologia da vegetação na detecção de anomalias de Cu (Darch & Barber 1983). Dados multissazonais MSS/Landsat, realçados digitalmente, foram também usados com sucesso na definição de áreas de *greisen* com mineralizações estaníferas em Goiás (Almeida Filho 1983).

Uma característica tem sido comum em todos esses trabalhos com imagens orbitais: o uso de técnicas de processamento digital na exploração de atributos espectrais e espaciais das cenas. Neste sentido, Lees *et al.* (1985) conseguiram detectar áreas de Hg associado com carbonatos serpentínicos, pelas

transformações por componentes principais de imagens TM/Landsat multitemporais. Da mesma forma, Paradella (1986) usou dados TM realçados na detecção de anomalias geobotânicas ligadas às mineralizações de Ti e fosfato nas intrusivas de Maracón e Maicuru, na região Amazônica.

Uma abordagem diferente, que integra dados de Sensoriamento Remoto (MSS e TM/Landsat) com dados geoquímicos e botânicos, tem sido apresentada com sucesso na pesquisa de sulfetos, por Banninger (1984, 1985a, b, 1986a, b).

Por meio de análises estatísticas dos vários dados co-registrados, foi possível estabelecer correlações significativas entre valores de radiância, concentrações de metais e variações estruturais do dossel (índices de área foliar).

A detecção de anomalias, nos vários exemplos discutidos, esteve baseada principalmente em variações na densidade de cobertura vegetal e/ou de espécies.

PERSPECTIVAS PARA O AMBIENTE AMAZÔNICO

A aplicação dos conceitos anteriormente discutidos para a região Amazônica, área de maior potencialidade mineral do país, representa um dos maiores desafios em Geobotânica e Sensoriamento Remoto. Para se ter uma idéia da complexidade do ambiente, basta considerar que em poucos hectares da floresta amazônica estão contidas mais espécies biológicas do que todas as presentes nas florestas frias e temperadas do hemisfério norte (Schubart 1986). Em contraste com esta riqueza natural, são precários os conhecimentos sobre as relações entre os diferentes substratos litológicos, solos, relevo e distribuição de comunidades vegetais e ecossistemas. Em adição, são raros os estudos dirigidos à verificação da presença de comunidades ou plantas indicadoras de minérios e/ou hidrocarbonetos, ou mesmo de outras manifestações de estresses induzidos geoquimicamente em vegetação para o ambiente amazônico.

Neste contexto, uma projeção sobre possibilidades de sucesso na aplicação de Geobotânica de Reconhecimento ou de Alvo neste ambiente fica circunscrita a um campo especulativo. Tomando-se como referência a província de Carajás, os dados publicados pelo Projeto Radambrasil, particularmente em seu capítulo sobre vegetação (Veloso *et al.* 1974), enfatizam a importância das variações litológicas, morfológicas e climáticas, ordenadas aqui pelo grau de influência, no controle da distribuição espacial dos diferentes ecossistemas. É sugerido que variações litológicas, além das diferenças químicas que resultam, influiriam no balanço hídrico das plantas, quanto ao maior ou menor poder de retenção do lençol d'água superficial. O papel da capacidade hídrica dos solos na formação da cobertura vegetal foi também ressaltado por Falesi (1986). Estas conclusões, à primeira vista, abrem perspectivas favoráveis ao uso da Geobotânica de Reconhecimento com dados de sensores orbitais, em que atributos vegetais como conteúdo de água foliar, índices vegetativos, de estresses etc. devem ser explorados, juntamente com padrões de textura. A utilização de variáveis geomorfométricas extraídas de modelos digitais do terreno pode ser de importância capital na definição de classes biofísicas em face da zonation altitudinal da vegetação em áreas de serranias florestadas.

As relações entre as propriedades químicas de rochas, solos lixiviados e diversidades de espécies não estão ainda esclarecidas. Moura (1982) apresentou resultados sobre a vinculação de propriedades químicas dos horizontes superficiais de solos com o substrato litológico para a área de cobre do Pojuca, apesar do intenso manto de intemperismo. Até que ponto tais relações podem manifestar-se na cobertura vegetal demanda um esforço bem dirigido de pesquisa em Geobotânica. Falesi (1986) menciona que não existe, a rigor, uma identidade entre a fertilidade dos solos (propriedade química) e a exuberância de espécies da vegetação. Amaral (1982) também atribui à pequena interação entre a floresta e os produtos de alteração de rochas no ambiente amazônico o insucesso na

detecção de anomalias espectrais com dados MSS-Landsat, associadas a estresses geoquímicos. Esta tendência de menor dependência dos vegetais com os nutrientes provenientes da alteração de rochas é mostrada na figura 10, pela dinâmica da circulação de nutrientes minerais no ecossistema florestal. Os valores em kg/ha dos elementos P, K e Ca, obtidos para Manaus por Klinge e citados por Schubart (1986), respectivamente, na biomassa aérea, nas raízes e matéria orgânica, e no solo mineral até 1 m de profundidade, indicam que o K e Ca estão armazenados praticamente na biomassa da floresta. Este comportamento também é típico para outros elementos na floresta tropical úmida. Este fato, aliado à grande diversidade de espécies e à pequena profundidade das raízes, pode limitar, em princípio, a possibilidade de sucesso na detecção de anomalias geobotânicas, particularmente do tipo *blue-shift* na floresta amazônica.

Figura 10 – Os fluxos de entrada, circulação interna e saída de nutrientes minerais na floresta de terra firme: 1. circulação interna; 2. entrada e saída de gases; 3. entrada por intemperismo de rochas e minerais de argila; 4. saída por lixiviação; 5. entrada com as chuvas. O fluxo através da circulação interna é muito grande, quando comparado com o das vias de entrada e saída de nutrientes do sistema (Adaptado de Schubart 1986)

Figure 10 – Influx, internal circulation, and efflux mineral nutrients of the Amazon (upland) forest: 1. internal circulation; 2. gas input and output; 3. input by rock weathering and clay minerals; 4. output by leaching; 5. input by rainfall. The flux through the internal circulation is much larger than the flux based on the nutrient inputs and outputs of the system (Adapted from Schubart 1986)

CONCLUSÕES A utilização da tecnologia de Sensoriamento Remoto tem permitido que novos enfoques no campo da Geobotânica sejam desenvolvidos. Instrumentos sensores a bordo de satélites oferecem a perspectiva única de se estudar a distribuição da vegetação pela visão sinóptica não-disponível com fotos aéreas convencionais. Em adição, a repetitividade de cobertura e a localização das bandas no espectro eletro-magnético, particularmente no caso das imagens TM/Landsat, estendendo-se além de 1,4 μm (intervalo não coberto por filmes), permitem que atributos vegetais importantes sejam detectados (variações fenológicas, índices vegetativos, conteúdo de água foliar etc.). Tais dados integrados com parâmetros do relevo fornecem a base para que, em áreas de densa cobertura vegetal, classes biofísicas sejam detectadas e seu significado avaliado no contexto geológico (Geobotânica de Reconhecimento).

Áreas não classificadas no terreno, áreas de superposição entre classes e/ou distribuições inconsistentes entre classes podem ser indicativas de anomalias geológicas e devem ser consideradas na reavaliação com outros tipos de dados e verificação de campo. Identificar padrões anômalos requer, na prática, um entendimento mínimo das condições geobotânicas gerais da área. Esta noção de *background* é importante não só como fonte de informação geológica na escala regional, como também na seleção de áreas para estudos de detalhe.

Limitações de resoluções dos sensores orbitais têm impedido a detecção direta de estresse do tipo *blue-shift* na cobertura vegetal. Sensores de elevada resolução espectral/espacial têm permitido, sob determinadas condições, a detecção direta dessas variações, diagnósticas da presença de anomalias minerais no substrato (Geobotânica de Alvo).

Como ferramenta operacional, a Geobotânica de Reconhecimento é mais simples de implementar e de custo bem inferior, sendo adequada nas fases iniciais de prospecção mineral e de levantamentos geológicos regionais, na reavaliação e/ou integração de dados e seleção de áreas para investigação detalhada (Geoquímica, Geofísica, Geobotânica de Alvo etc.). Já a Geobotânica de Alvo deve ser considerada dentro do enfoque experimental. Áreas de características homogêneas com pequenas variações entre espécies, idades de espécimes, dosséis são exceções na natureza. Isso implica muitas restrições à operacionalização de métodos de exploração mineral baseados em Geobotânica de Alvo. Para ambientes tropicais como o amazônico, o quadro torna-se ainda menos promissor devido à diversidade de espécies, à menor dependência vegetal com os nutrientes do solo e às características desfavoráveis da pequena profundidade de raízes e espesso manto de alteração.

Agradecimentos Esta pesquisa foi desenvolvida por um programa de cooperação científica entre o Inpe e o CCRS, com suporte financeiro fornecido pelo CNPq (Processo 20.0817/87.6). Os autores expressam seus agradecimentos aos pesquisadores do Inpe Dalton de Morisson Valeriano e Dr. José Carlos Neves Epiphânio, pela análise crítica do texto; e a Maria do Carmo S. Soares, pela revisão de linguagem.

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- ALMEIDA FILHO, R. 1983. *Sensoriamento Remoto orbital aplicado a prospecção mineral de corpos graníticos das províncias estancíferas de Goiás e de Rondônia: uma contribuição metodológica*. São Paulo, 158p (Tese de Doutorado, IG/USP).
- AMARAL, G. 1982. Aplicabilidade da análise automática de imagens Landsat na pesquisa mineral do Interflúvio Araguaia-Xingu. In: SIMPÓSIO BRASILEIRO DE SENSORIAMENTO REMOTO, 2, Brasília. *Anais*. p.197-206.
- BANNINGER, C. 1984. Detection of heavy metal stressed vegetation using Landsat digital data. In: INTERNATIONAL SYMPOSIUM ON REMOTE SENSING OF ENVIRONMENT, 18. Paris. *Proceedings*. p. 1101-1104.
- BANNINGER, C. 1985a. Geobotanical remote sensing of heavy metal stressed vegetation using Landsat MSS data. In: THEMATIC CONFERENCE ON REMOTE SENSING FOR EXPLORATION GEOLOGY, 4, San Francisco. *Proceedings*. p. 339-345.
- BANNINGER, C. 1985b. Spectral analysis of a heavy metal-stressed forest canopy using Landsat TM data. In: INTERNATIONAL COLLOQUIUM ON SPECTRAL SIGNATURES OF OBJECTS IN REMOTE SENSING, 3. Les Arcs, Paris. *Proceedings*. p. 403-407.
- BANNINGER, C. 1986a. Relationship between tree density, leaf area index, soil metal content and Landsat MSS Canopy radiance

- values. In: IGARSS'86 SYMPOSIUM, Zurich. *Proceedings*. p. 1401-1404.
- BANNINGER, C. 1986b. Effects of heavy metal induced canopy structural changes on forest canopy reflectance. In: THEMATIC CONFERENCE ON REMOTE SENSING FOR EXPLORATION GEOLOGY, 5. Nevada. *Proceedings*. p. 465-469.
- BELANGER, J.R. & RENCZ, A.N. 1983. Prospecting in glaciated terrain integrating airborne and Landsat MSS. *Advanced Space Research*, 3(2):187-191.
- BIDWELL, R.G.S. 1979. *Plant Physiology*. 2 ed. New York, MacMillan. 726 p.
- BOLVIKEN, B.; HONEY, F.; LEVINE, S.R.; LYON, R.J.P.; PRELAT, A. 1977. Detection of naturally heavy-metal poisoned areas by Landsat-1 digital data. *Journal Geochemical Exploration*, 8:457-471.
- BONHAM-CARTER, G.F. & RENCZ, A.M. 1982. Extracting geological information from resampled Landsat data, Baker Lake, NW Territories, Canada. In: THEMATIC CONFERENCE ON REMOTE SENSING FOR EXPLORATION GEOLOGY, 2. Forth Worth, Texas. *Proceedings*. p. 139-148.
- BROOKS, R.R. 1972. *Geobotany and Biochemistry in mineral exploration*. New York, Harper & Row ed. 290 p.
- BROOKS, R.R. 1983. *Biological methods of prospecting for minerals*. New York, John Wiley & Sons ed. 322 p.
- BRUCE, W.D. & SINGHROY, V. 1984. *Landsat data for operational mineral exploration: the canadian experience*. Canada Centre for Remote Sensing-CCRS, 12p. (Resors Number 1050207).
- BRUCE, W.D. & HORNSBY, J.K. 1987. A canadian perspective on the application of satellite remote sensing to regional geobotany. *Geocarto International*, 3:53-59.
- CAMACHO, S.R.; RIO, L.D.; SANCHES, L.; GONZALES, J. 1982. Impact of hydrothermally altered soil on vegetation as a tool in geothermal exploration. In: INTERNATIONAL SYMPOSIUM ON REMOTE SENSING OF ENVIRONMENT, 16. Buenos Aires. *Proceedings*. p. 145-153.
- CANNEY, F.C. 1969. Remote detection of geochemical soil anomalies. In: ANNUAL AIRCRAFT PROGRAM STATUS, Review, 2., Houston, TX, Sept. 1969. Houston, TX, NASA Manned Spacecraft Center, v. 1 Geology and Geography, p. 1-8 (NASA TM-X 66913).
- CANNEY, F.C.; WENDEROTH, S.; YOST, E. 1970. Relationship between vegetation reflectance spectra and soil geochemistry: new data from Cat Heart Mountain, Maine. In: ANNUAL EARTH RESOURCES PROGRAM, Review 3., Houston Tx, Dec. 1-3, 1970. Houston, Tx, NASA, Manned Spacecraft Center, v. 1, p. 18.1-18.9. (NASA TM-X 67404).
- CANNON, H.L. 1960. Botanical prospecting for ore deposits. *Science*, 132:591-598.
- CANNON, H.L. 1971. The use of plant indicators in ground water surveys, geology mapping and mineral prospecting. *Taxon*, 20:227-256.
- CHANG, S.H. & COLLINS, W. 1980. Toxic effect of heavy metals on plants. In: PECORA SYMPOSIUM, 6. Sioux Falls. *Proceedings*. p. 122-124.
- CHANG, S.H. & COLLINS, W. 1983. Confirmation of the airborne biogeophysical mineral exploration techniques using laboratory methods. *Economy Geology*, 78(4):723-736.
- CHISKISHEV, A.G. 1965. *Plant indicators of soils, rocks and subsurface water*. New York, N.Y. Consultants Bureau 210 p.
- CIBULA, W.G. 1982. *Utilization of Landsat multispectral data in geobotanical investigations: the location of ironstone gravel in the Sam Houston National Forest*. NASA 12p. (NASA Earth Resources Lab., NSTL Station, Rept. 199).
- COLE, M.M. 1971. *The importance of environment in biogeographical/geobotanical and biogeochemical investigations*. Canadian Inst. of Mining and Metallurgy, p. 414-425. (Geochemical Exploration, Special vol. 11).
- COLLINS, W.; CHANG, S.H.; RAINES, G.; CANNEY, F.; ASHLEY, R. 1983. Airborne biogeochemical mapping of hidden mineral deposits. *Economy Geology*, 78(4):737-749.
- DARCH, J. & BARBER, J. 1983. Multitemporal remote sensing at a geobotanical anomaly. *Economy Geology*, 78(4):770-782.
- DEFEO, N.J.; BIRNIE, R.W.; MILLER, K.G. 1986. Remote sensing of geobotanical associations in clastic sedimentary terrain. In: THEMATIC CONFERENCE ON REMOTE SENSING FOR EXPLORATION GEOLOGY, 5. Nevada. *Proceedings*. p. 723-732.
- FALESI, I. 1986. O ambiente edáfico. In: ALMEIDA Jr., J.M.G. (org.) *Carajás: desafio político, ecologia e desenvolvimento*. CNPq & Brasiliense ed., cap. 6, p. 125-155.
- FRANKLIN, S.E.; PEDDLE, D.R.; MOULTON, J.E. 1988. Spectral/geomorphometric discrimination and mapping of terrain: a study in Gros Morne National Park. Submetido ao *Canadian Journal of Remote Sensing* em junho, 19 p.
- GOETZ, A.F.H.; ROCK, B.N.; ROWAN, L.C. 1983. Remote sensing for exploration: An overview. *Economy Geology*, 78(4):573-590.
- GREEN, G.; ARVIDSON, R.; SULTAN, M.; GUINNESS, E. 1985. Geobotanical information contained in Landsat Thematic Mapper Images covering southern Missouri. In: THEMATIC CONFERENCE ON REMOTE SENSING FOR EXPLORATION GEOLOGY, 4. San Francisco. *Proceedings*. p. 371-380.
- HARE, E.W.; EDWARDS, G.R.; MILLER, J.R. 1984a. Geobotanical remote sensing of small localized swamps and bogs in northern Ontario. In: THEMATIC CONFERENCE ON REMOTE SENSING FOR EXPLORATION GEOLOGY, 3. Colorado. *Proceedings*. p. 671-682.
- HARE, E.W.; MILLER, J.R.; EDWARDS, G.R. 1984b. Studies of the vegetation red reflectance edge in geobotanical remote sensing in eastern Canada. In: CANADIAN SYMPOSIUM ON REMOTE SENSING, 9. Newfoundland. *Proceedings*. p. 433-440.
- HORLER, D.N.H.; BARBER, J.; BARRINGER, A.R. 1980. Effects of heavy metals on the absorbance and reflectance spectra of plants. *International Journal of Remote Sensing*, 1:121-136.
- HORLER, D.N.H.; DOCKRAY, M.; BARBER, J. 1983. The red edge of plant leaf reflectance. *International Journal of Remote Sensing*, 4(2):273-288.
- HORLER, D.N.H. 1985. *Geobotany: the state of the art in Canada*. Canada Centre for Remote Sensing, 90p. (DSS contract, File 195R/23423-48150).
- HORNSBY, J.K. & BRUCE, W.D. 1986. Regional geobotany with TM: a Sudbury case study. In: CANADIAN SYMPOSIUM ON REMOTE SENSING, 10. Alberta. *Proceedings*. p. 601-609.
- HORNSBY, J.K. & BRUCE, W.D. 1988. Assessing aggregate resource potential in the Canadian Shield: a knowledge based approach. In: THEMATIC CONFERENCE ON REMOTE SENSING FOR EXPLORATION GEOLOGY, 6., Houston. *Proceedings*. 13p.
- HORNSBY, J.K.; BRUCE, W.D.; HARRIS, J.; RENCZ, A.N. 1988. Implementation of background and target geobotanical techniques in mineral exploration. In: THEMATIC CONFERENCE ON REMOTE SENSING FOR EXPLORATION GEOLOGY, 6. Houston. *Proceedings*. 11p.
- HOWARD, J.A.; WATSON, R.D.; HESSIN, T.D. 1971. Spectral reflectance properties of *Pinus ponderosa* in relation to copper content of the soil-malachite mine, Jefferson County, Colorado. In: INTERNATIONAL SYMPOSIUM ON REMOTE SENSING OF ENVIRONMENT, 7. Michigan. *Proceedings*. p. 285-297.
- KNIPLING, E.B. 1970. Physical and physiological basis for the reflectance of visible and near-infrared radiation from vegetation. *Remote Sensing of Environment*, 1:155-159.
- LABOVITZ, M.L.; MASUOKA, E.J.; BELL, R.; SIEGRIST, A.W.; NELSON, R.F. 1983. The application of remote sensing to geobotanical exploration for metal sulfides. *Economy Geology*, 78(4): 750-760.
- LEES, R.D.; LETTIS, W.R.; BERNSTEIN, R. 1985. Evaluation of Landsat thematic mapper for geologic applications. *IEEE*, 73(6):1108-1117.
- LEFEVRE, M.J. 1980. Télédétection et anomalies géochimiques à Echassières (Alier, France). *Chronique Recherche Minière*, 453:41-63.
- LYON, G.L.; PETERSON, P.J.; BUTLER, G.W. 1970. Some trace elements in plants from serpentine soils. *New Zealand Journal Science*, 13:133-139.
- LYON, R.J.P. 1975. Correlation between ground metal analysis, vegetation reflectance and ERTS brightness over a molybdenum skarn deposit, Pine Nut Mountains, Western Nevada. In: INTERNATIONAL SYMPOSIUM ON REMOTE SENSING OF ENVIRONMENT, 10. Michigan. *Proceedings*. p. 1031-1041.
- MALYUGA, D.P. 1964. *Biogeochemical methods*. New York, Consultants Bureau. 205p.
- MILTON, N.M.; COLLINS, W.; CHANG, S.H.; SCHMIDT, R.G. 1983. Remote detection of metal anomalies on Pilot Mountain, Randolph County, North Carolina. *Economy Geology*, 78(4):605-617.
- MILLER, J.R.; BOYER, M.G.; WU, J.; GAUTHIER, R.P.; HARE, E.W.; BELANGER, M. 1988. Detection of spectral effects in individual trees using high-resolution pushbroom imagery. In: INTERNATIONAL CONGRESS OF PHOTOGRAMMETRY AND REMOTE SENSING, 16. Kyoto, Japan. *Proceedings*, 16p.
- MILTON, N. & MOUAT, D. 1984. Spatial and spectral resolution in geobotany. In: THEMATIC CONFERENCE ON REMOTE SENSING FOR EXPLORATION GEOLOGY, 3. Colorado. *Proceedings*. p. 173-182.
- MOUAT, D.A. 1982. The response of vegetation to geochemical condition. In: THEMATIC CONFERENCE ON REMOTE SENSING FOR EXPLORATION GEOLOGY, 2. Forth Worth, Texas. *Proceedings*. p. 7-84.
- MOURA, C.A.V. 1982. *Tratamento estatístico de dados geoquímicos e sua aplicação ao mapeamento geológico e definição de anomalias geoquímicas no alvo 2 - corpo 4, Província Mineral de Carajás*. Belém, 61p (Dissertação de Mestrado, UFPa/CPGCGG).
- PARADELLA, W.R. & VITORELLO, I. 1982. Sensores remotos na Geologia: tendência atual e perspectivas futuras com dados de

- satélite. *Ciências da Terra*, 5:19-23.
- PARADELLA, W.R.; 1983. *Discriminação de unidades litológicas no Baixo Vale do rio Curaçá (Bahia), através de realces por processamento digital de dados MSS Landsat-3*. São Paulo, 233p. (Tese de Doutorado, IGUSP)
- PARADELLA, W.R. 1986. Avaliação preliminar de dados TM Landsat para exploração mineral na região Amazônica: intrusivas de Maracaná e Maicuru (Pará). In: CONGR. BRAS. DE GEOL., 34, Goiânia, 1986, *Anais...* Goiânia, SBG, p.2951-2964.
- PRESS, N.P. & NORMAN, J.W. 1972. Detection of orebodies by remote sensing effects of metals on vegetation. *Trans. Inst. Mining and Metallurgy*, London, 81:166-168.
- PRESS, N.P. 1974. Remote sensing detect the toxic effects of metals on vegetation for mineral exploration. In: INTERNATIONAL SYMPOSIUM ON REMOTE SENSING OF ENVIRONMENT, 9. Michigan, *Proceedings*, p.2027-2038.
- PRICE, C. & BIRNIE, R.W. 1985. Discrimination of lithologic units on the basis of botanical associations and Landsat TM spectral data in the Ridge and Valley Province, Pennsylvania. In: THEMATIC CONFERENCE ON REMOTE SENSING FOR EXPLORATION GEOLOGY, 4. San Francisco. *Proceedings*, p.125-140.
- RENCZ, A.N.; BONHAM-CARTER, G.F.; GREINT, C.V.D.; MILLER, J.R.; HARE, E.W. 1986. Preliminary results from modelling vegetation spectra derived from MEIS data, Algonquin Park, Ontario. In: CANADIAN SYMPOSIUM ON REMOTE SENSING, 10. Edmonton. *Proceedings*, p.909-917.
- RINGROSE, S.M.; LARGE, P.; JOLLY, J.P.; BRUCE, W.D. 1981. Application of Landsat imagery to natural resources management. In: CANADIAN SYMPOSIUM ON REMOTE SENSING, 7. Winnipeg. *Proceedings*, 12p.
- ROCK, B. 1984. Remote detection of geobotanical anomalies associated with hydrocarbon microseepages. In: THEMATIC CONFERENCE ON REMOTE SENSING FOR EXPLORATION GEOLOGY, 3. Colorado. *Proceedings*, p.183-195.
- ROSE, A.W.; HAWKES, F.E.; WEBB, J.S. 1979. *Geochemistry in mineral exploration*. 2 ed. Toronto, Academic Press. 657p.
- SANTOS, B.A. dos 1981. *Amazônia: potencial mineral e perspectiva de desenvolvimento*. São Paulo, T.A. Queiros ed. 256p.
- SANTOS, B.A. dos 1986. Recursos minerais. In: ALMEIDA Jr., J.M.G. (org.) *Carajás: desafio político, ecologia e desenvolvimento*. CNPq & Brasiliense ed., cap. 13. p.294-361.
- SCHUBART, H.O.R. 1986. Dinâmica de ecossistemas. In: ALMEIDA Jr.; J.M.G. (org.) *Carajás: desafio político, ecologia e desenvolvimento*. CNPq & Brasiliense ed., cap. 3. p. 30-58.
- SCHWALLER, M.R. & TRACK, S.J. 1986. A geobotanical investigation of an exploration sized territory. In: THEMATIC CONFERENCE ON REMOTE SENSING FOR EXPLORATION GEOLOGY, 5. Nevada. *Proceedings*, p.483-489.
- SLATER, P.N. 1980. *Remote sensing optics and optical systems*. Reading, USA Addison-Wesley ed., 515p.
- SINGHROY, V. 1985. Spectral geobotany in glaciated environments: test over a mineralized till site in Northern Ontario. In: THEMATIC CONFERENCE ON REMOTE SENSING FOR EXPLORATION GEOLOGY, 4. Michigan *Proceedings*, p.701-719.
- SINGHROY, V.; STANTON-GRAY, R.; SPRINGER, J. 1986. Spectral geobotanical investigation of mineralized till sites. In: THEMATIC CONFERENCE ON REMOTE SENSING FOR EXPLORATION GEOLOGY, 5. Nevada. *Proceedings*. 21p.
- SINGHROY, V. & BRUCE, W.D. 1977. Surficial geology in the Pas area of Manitoba: an application of digital Landsat data. In: CANADIAN SYMPOSIUM ON REMOTE SENSING, Quebec City. *Proceedings*. p.57-66.
- STRINGER, W.J.; MILLER, J.M.; BELON, A.E.; SHAPIRO, L.H.; ANDERSON, J.H. 1975. Application of satellite R.S. data to land selection and management. In: NASA. Lyndon B. Johnson Space Center Earth Resources Survey Symposium. Houston, Tx, June 9-12, 1975. Washington, DC, v. 1c, p.1785-1795 (NASA TM X-58168).
- TARANIK, J.V.; REYNOLDS, C.D.; SHEEHAN, C.A.; CARTER, W.D. 1978. Targeting exploration for nickel laterites in Indonesia with Landsat data. In: INTERNATIONAL SYMPOSIUM ON REMOTE SENSING OF ENVIRONMENT, 12. Michigan. *Proceedings*, p.1037-1051.
- TUCKER, C.J. 1978. An evaluation of the first four Landsat-D thematic mapper reflective sensors for monitoring vegetation. *Photogrammetric Engineering and Remote Sensing*, 44:1369-1380.
- VELOSO, J.; JAPIASSU, A.M.S.; GOES FILHO, L.; LEITE, P.F. 1974. *As regiões fitoecológicas, sua natureza e seus recursos econômicos. Estudo fitogeográfico da área abrangida pelas folhas de SB.22 Araguaia e SC.22 Tocantins*. Projeto Radambrasil, vol. 4, 119p.
- WOODELL, G.M. 1978. The carbon dioxide question. *Scientific American*, 238(1). p.42.
- YOST, E. & WENDEROTH, S. 1971. The reflectance spectra of mineralized trees. In: INTERNATIONAL SYMPOSIUM ON REMOTE SENSING OF ENVIRONMENT, 7. Michigan, *Proceedings*, p.269-284.

MANUSCRITO A591

Recebido em 21 de fevereiro de 1989

Revisão do autor em 01 de agosto de 1989

Revisão aceita em 03 de agosto de 1989