

Harry Alberto Bollmann ♦ Marlise A. Bassani ♦ Antonio Carlos
Simões Pião ♦ Andreas Klumpp ♦ Josanidia Santana Lima ♦
Mário Tomazello Filho ♦ Paulo Cesar Botosso ♦ Claudio Sergio Lisi ♦
Ronaldo Viana Soares ♦ Antonio Celso de Oliveira Braga ♦
Edmo José Dias de Campos ♦ Eduardo Bertoletti ♦ Murilo Damato ♦
Mônica Luisa Kuhlmann ♦ Ana Lúcia Brandimarte ♦
Gisela Yuka Shimizu ♦ Maurício Anaya ♦ Walter Barrella ♦
Alder Guilherme Viadana ♦ Carlos Mello Garcias

Indicadores ambientais: conceitos e aplicações

Nilson Borlina Maia
Henry Lesjak Martos
Walter Barrella

organizadores

Esta publicação contou com o apoio do Comitê dos Produtores da Informação Educacional (Comped) e teve sua reprodução contratada pelo Instituto Nacional de Estudos e Pesquisas Educacionais (Inep), no âmbito do Programa Publicação de Apoio à Formação Inicial e Continuada de Professores.



educ

inep

São Paulo
2001

Josanidia Santana Lima

Processos biológicos e o biomonitoramento: aspectos bioquímicos e morfológicos

Princípios e conceitos da bioindicação nas ciências ambientais

Com o desenvolvimento industrial, entre outras coisas, surgiram palavras novas em nosso vocabulário. Algumas já têm seu significado incorporado em nosso dia-a-dia, tais como poluente e poluição. Entretanto, perceber e mensurar o efeito de poluentes no ambiente exige, na maioria das vezes, um esforço multidisciplinar. Avaliar o comportamento do poluente no ambiente, ou seja, monitorar a sua ação através de organismos vivos é um tópico relativamente novo nas ciências ambientais, que tem sido chamado de *biomonitoramento* ou *bioindicação*. O fundamento disso é que um estímulo ambiental, assim como um estímulo proveniente de um poluente, provoca reações no organismo vivo e pode acarretar várias alterações em seu funcionamento. Nos métodos da bioindicação, o comportamento do organismo ante um agente estressor é utilizado na avaliação da qualidade de uma dada área.

Mais recentemente, os termos biomonitoramento, biomonitor, bioindicação, bioindicador ou, simplesmente, monitoramento, têm sido freqüentemente usados na biologia aplicada, ecologia e ciências ambientais. Embora o número de publicações nessa área tenha crescido enormemente (Markert, em 1993, fez uma citação de vários autores que tratam do assunto), existe uma grande confusão na terminologia. De acordo com Ernst (1993), o mais velho relato sobre plantas indi-

cadoras tem mais de 400 anos (Thalius, 1588). Porém, o termo (bio)indicador começou a ser usado mais freqüentemente na literatura biológica alemã a partir dos anos 1960. Markert (1993) afirma existirem publicações anteriores.

O termo biomonitoramento teve ênfase na Alemanha, em uso de vegetais no monitoramento da poluição atmosférica. Nos países de língua inglesa o termo (bio)monitoramento começou a ser freqüente a partir dos anos 1980. Geralmente, autores alemães usam "bioindicação" e "biomonitoramento" mais ou menos como sinônimos. A diferença entre os dois termos é que a indicação parece ser mais espontânea e ativa, enquanto o monitoramento é contínuo e passivo (o indicador faz alguma coisa, o monitor é usado para fazer alguma coisa). Cada vez mais autores sugerem diferenças e especificidades. A bioindicação (monitoramento) é baseada em reações visíveis do organismo indicador. Esses métodos são chamados de indicação (monitoramento) sensitiva. A segunda possibilidade é selecionar espécies que acumulem a substância a ser monitorada, medindo a concentração da substância no organismo. Esse procedimento é chamado de indicação acumulativa.

Para Müller (1980), a bioindicação envolve a decodificação de informações de biosistemas com o propósito de avaliar uma dada área (área) ou domínio. Essa definição não inclui o fator tempo nem a possibilidade de se usarem organismos-testes. Steubing (1982, 1985) afirma que bioindicador é o mesmo que biomonitor. Ela escreve que o biomonitoramento não fornece nenhuma resposta sobre a concentração da imissão presente. Vale ressaltar que emissão é a liberação pela fonte produtora, enquanto a imissão é a concentração da emissão que atinge o organismo ou objeto. Considera-se, portanto, o que se dilui durante o transporte. De acordo com Arndt et alii (1987), bioindicadores são definidos como organismos ou comunidades que respondem à poluição ambiental, alterando suas funções vitais ou acumulando toxinas. Esse autor exclui a indicação em áreas em condições naturais. Já em 1996 Arndt amplia sua definição para

Bioindicadores são organismos ou comunidades que reagem a alterações ambientais modificando suas funções vitais e/ou sua composição química e com isso fornecem informações sobre a situação ambiental.

Segundo Schubert (1991), bioindicadores são organismos ou comunidades cujas funções vitais se correlacionam tão estreitamente com determinados fatores ambientais que podem ser empregados como indicadores na avaliação de uma dada área. Essa definição inclui conscientemente a indicação de comportamentos naturais, como, por exemplo, na agricultura, na qual podemos inferir sobre características de uma região apenas pela presença ou ausência de determinadas espécies vegetais. Markert (1993) faz a seguinte definição sobre bioindicação e biomonitoramento:

Bioindicação é o uso de um organismo (uma parte do organismo ou uma sociedade de organismos) para se obter informações sobre a qualidade do seu ambiente ou parte dele. Organismos que são capazes de fornecer informações sobre a qualidade do seu ambiente são bioindicadores. Biomonitoramento é a observação contínua de uma área com a ajuda de bioindicadores, os quais, neste caso, devem ser chamados de biomonitores. Normalmente, toda observação contínua possibilita uma avaliação semiquantitativa dos resultados. Usando uma comparação do dia-a-dia: a diferença entre bioindicação e biomonitoramento é a mesma que existe entre uma fotografia e um filme.

Com freqüência, o conceito bioindicação é usado para definir reações, dependentes de uma variável temporal, a um fator ambiental antropogênico ou modificado antropicamente, manifestadas através de respostas mensuráveis provenientes de um objeto ou sistema biológico. Essas respostas têm que ser comparáveis em situações padronizadas.

O desenvolvimento na área do monitoramento biológico, especialmente na Europa, provocou o surgimento de inúmeras designações para métodos e enfoques que se desenvolveram em conexão com diferentes linhas de pesquisas e aplicações práticas. Apesar de algumas divergências, existe uma concordância entre os autores, de que o uso de organismos naturalmente existentes em uma dada área de pesquisa deve ser chamado de biomonitoramento passivo, enquanto que o biomonitoramento ativo é feito com a exposição de organismos na área a ser avaliada por um tempo definido em condições controladas. Fica claro que existe uma grande diferença entre os métodos passivos e ativos. Por isso não há dúvidas sobre a necessidade dos termos.

Na Alemanha, a VDI – Verein Deutscher Ingenieure (Associação de Engenheiros Alemães) estará editando brevemente normas técnicas (*Richtlinien*) que pretendem unificar as terminologias usadas no biomonitoramento/bioindicação.

A reação sensível de um organismo ante a qualidade do seu ambiente, que pode ser usada como indicação (monitoramento), pode ser no nível bioquímico, fisiológico, morfológico, comportamental, etc. Todas essas reações dependem não somente do fator a ser indicado (monitorado), mas também do nível nutricional, da disponibilidade de água, de outros fatores ambientais como luminosidade, temperatura, idade do organismo, sexo, fase de desenvolvimento, características genéticas, concorrência entre indivíduos ou espécies, etc. O mesmo deve ser considerado ao se estudar o acúmulo de uma certa substância. A padronização dos monitores é, por isso, um fator de fundamental importância em programas de monitoramento.

Processos biológicos e reações a estressores

A bioindicação se fundamenta no princípio de que os sistemas biológicos possuem um estado de estabilidade elevada e um equilíbrio dinâmico. Todo sistema biológico, independentemente de ser organismo, população ou comunidade, adaptou-se a um complexo de fatores ambientais ao longo da sua evolução. Na biosfera, ele conquistou um espaço e um nicho ecológico, onde encontra as condições necessárias e favoráveis à sua manutenção e reprodução. Entretanto, alterações dos fatores ambientais sob influência de estressores antrópicos levam a outros estados de estabilidade. Os organismos reagem, alguns se adaptam; porém, quando ultrapassam sua capacidade de adaptação, eles podem apresentar sintomas visíveis. Nesse caso, o reconhecimento da reação do indicador, como um todo, ocorre somente após o aparecimento de certos danos visíveis, como necrose e clorose. O reconhecimento preventivo de danos seria mais vantajoso, especialmente quando os danos podem ser irreversíveis, cessando a influência da fonte poluidora. Parâmetros bioquímicos e fisiológicos sensíveis podem indicar o início do estresse em concentrações ainda baixas de estressores. A bioindicação, nos níveis celulares e subcelulares, não é perceptível, porém mensurável através de metodologias da biologia molecular, da fisiologia e da bioquímica.

Os indicadores nesse contexto são reações bioquímicas, morfológicas e fisiológicas. Estruturas menores, como organelas isoladas (cloroplastos e mitocôndrias) ou reações bioquímicas e fisiológicas, são mais sensíveis à instabilidade ambiental. Seus limites são mais estreitos, elas reagem mais sensivelmente às perturbações. Alterações na concentração de ácido ascórbico, proteínas, amido, enzimas, produção de O_2 de protoplastos isolados de plantas superiores, fluorescência de clorofila de algas, são alguns exemplos de parâmetros que podem ser mensurados no biomonitoramento, fornecendo informações sobre alterações da qualidade ambiental.

Quanto à terminologia, Wieler (1897) e Sorauer e Ramann (1899) denominam “danos invisíveis” as perturbações bioquímicas e fisiológicas imperceptíveis a olho nu ou aparentemente invisíveis. Vogl et alii (1965) usam a expressão “lesão fisiológica”; Härtel (1976) postula “desgoverno” para danos fisiológicos reversíveis, enquanto os danos irreversíveis são chamados de “lesões”. Keller (1977) sugere “lesão latente” para efeitos de imissões na silvicultura e Rabe (1982) escreve sobre “lesões sutis”.

As lesões latentes incluem todas as formas de danos que um organismo (bioindicador) possa sofrer, que não possam ser percebidas a olho nu. São incluídas todas as reações fisiológicas e bioquímicas reversíveis ou irreversíveis, independentemente da consequência dessas lesões, se provocam inibição de crescimento, da vitalidade, alteram a resistência a parasitas ou outras doenças, bem como a suscetibilidade a fatores ambientais.

Concentrações relativamente baixas de estressores podem ter efeito nocivo ao vegetal do ponto de vista agrônomo, sem que, necessariamente, apareçam danos visíveis ou aos quais possam ser associados prejuízos econômicos. Porém, em ecossistemas naturais, essa situação pode provocar alterações, ainda que de pequena dimensão. A quantidade e qualidade de uma colheita, por exemplo, pode sofrer uma redução em função da inibição da fotossíntese ou formação de substâncias tóxicas, como o peróxido. A atividade da peroxidase pode ser incrementada mesmo quando o estressor se apresenta em concentrações ainda baixas. Esse incremento não é necessariamente específico a determinado tipo de estressor.

Através da análise de reações bioquímicas e fisiológicas a determinado estressor natural e/ou antropogênico, comparando-se com um controle apropriado (por exemplo, plantas expostas em área não poluída), podem-se obter informações importantes sobre o grau de poluição de uma determinada região, até mesmo sem o aparecimento de danos visíveis. É importante, para a bioindicação, que se conheça o maior número possível de critérios e parâmetros de aplicação prática.

Do ponto de vista metodológico, é importante diferenciar reações provocadas por fatores antropogênicos daquelas provenientes de fatores ambientais naturais, como pH, temperatura, luminosidade, etc. Para isso é fundamental que a metodologia seja padronizada e que as áreas impactadas e a área-controle (*background*) apresentem características ambientais o mais semelhante possível.

Metabolismo e a bioindicação

O metabolismo celular ocorre seguindo alguns princípios: é altamente econômico; possui propriedades auto-reguladoras; é ligado a estruturas subcelulares, supracelulares e estrutura molecular; é organizado dentro de uma hierarquia estrutural e funcional. Por que ele é importante? Ele disponibiliza estruturas altamente energéticas, como o ATP; disponibiliza estruturas redutoras, como o NADPH⁺, H⁺; disponibiliza elementos intermediários, como mononucleotídeos, aminoácidos, acetil-coenzima A e monossacarídeos, usados na síntese de ácidos nucléicos, proteínas, lipídeos e carboidratos; biosintetiza biomacromoléculas com funções específicas, como biocatalisadores, mensageiros, substâncias de reserva, elementos estruturais, etc.

É com a ajuda das reações de regulação e controle altamente sintonizadas que o metabolismo possibilita que as necessidades dos organismos sejam satisfeitas, considerando que existe uma coerência entre os organismos e o ambiente onde eles vivem. Especialmente os ácidos nucléicos (mensageiros de informações genéticas) e as proteínas (como enzimas e elementos estruturais) são responsáveis pelas atividades metabólicas. Por isso, é essencial que essas macromoléculas trabalhem na velocidade e especificidade corretas. Fatores ambientais e/ou antropogênicos adversos podem interferir no funcionamento dessas macromoléculas.

O metabolismo é regulado por várias enzimas. Enzimas sensíveis podem funcionar como indicadores de sinais (indícios) de alterações no metabolismo. Além da quantidade da enzima produzida, os estressores podem influenciar a atividade enzimática de diferentes modos: inibição competitiva – substrato (S) e inibidor = estressor (I) concorrem pelo mesmo lugar de ligação na enzima (E); inibição não-competitiva – o estressor (I) reage com o complexo E-S (enzima/substrato), responsável pela catálise ou influencia a ligação do substrato na enzima; competição preferencial – o estressor (I) tem uma afinidade maior pelo complexo E-S do que pela enzima livre (E). A formação de um complexo I-E-S ocorre muito rapidamente.

Estressores antropogênicos podem agir nos níveis molecular e celular, interferindo na organização, estrutura e composição de biomembranas (alterações na permeabilidade); na concentração e atividade de macromoléculas (alterações na concentração e atividade de enzimas); na produção, incremento ou inibição de substâncias que funcionam como reagentes de proteção ou antiestresse (prolina, por exemplo); na indução de novo sistema metabólico ou alterações de decurso (processo) de reações bioquímicas, provocando alterações na composição celular.

Para usar sinais de bioindicadores na avaliação de alterações do estado normal do sistema, faz-se necessário que as oscilações dos parâmetros a serem analisados sejam conhecidas dentro de um espectro de situação de normalidade. Os bioindicadores devem mostrar reações proporcionais ou graduais, refletindo o grau de alteração sofrida pelo ambiente. A bioindicação em nível bioquímico e fisiológico funciona no reconhecimento precoce do efeito de impactos ambientais. Entretanto, é importante considerar que, normalmente, podem ocorrer várias reações bioquímicas e fisiológicas ao mesmo tempo. Abaixo, alguns exemplos de reações que podem ser consideradas como parâmetros no monitoramento da qualidade ambiental. A maioria das metodologias foram desenvolvidas em estudos sobre avaliação dos efeitos da poluição atmosférica na vegetação (Dässler, 1991).

Biomembranas – A alteração da permeabilidade de membranas leva a alterações no transporte e na concentração de íons inorgânicos e substâncias moleculares, que regulam a atividade enzimática. A maioria das reações bioquímicas ocorre em áreas limitadas por membranas. Para influenciar reações bioquímicas e fisiológicas, o

estressor tem de ser capaz de penetrar a estrutura membranar na forma ativa (Schubert, 1991). Com alterações do balanço osmótico ocorre o transporte anormal de água e íons através das membranas. As alterações e danos subseqüentes no metabolismo celular ocorrem como resultado do efeito do poluente ou seus metabólitos, como toxina citoplasmática específica, sobre as enzimas e intermediários.

Fotossíntese – A fotossíntese pode reagir muito sensivelmente a alterações de fatores ambientais. Desde Wieler (1902), a fotossíntese é usada como parâmetro para comprovar reações a estressores, especialmente poluição do ar. Schubert (1991) cita vários autores que explicam causas das alterações no comportamento da fotossíntese provocadas pelo SO₂ como agente da poluição do ar: alterações não específicas da integridade da membrana; inibição do metabolismo, do O₂ e do transporte de elétrons do fotossistema II; efeitos mais ou menos específicos de diferentes enzimas são algumas delas.

Fluorescência do cloroplasto – Pigmentos que absorvem luz nos comprimentos entre 400 e 700 nm são mediadores da atividade fotossintética. Cloroplastos intactos emitem espontaneamente luz, denominada fluorescência. A propriedade da fluorescência é usada como indicador na avaliação de danos em vegetais submetidos a situação de estresse por poluição atmosférica (Arndt, 1974; Schreiber et alii, 1978; Schlee et alii, 1981). A fluorescência do cloroplasto está diretamente ligada a processos primários da fotossíntese, por isso a propriedade da emissão de fluorescência dos cloroplastos é tomada como indicador da qualidade ambiental.

Assimilação de CO₂ – Pode ocorrer a inibição da fixação do CO₂, como conseqüência da concorrência entre o CO₂ e o SO₂ pela ligação no centro ativo da enzima ribulosebifosfatocarboxilase (Ziegler, 1972 e 1973). Concentrações elevadas de SO₂ inibem a fotossíntese em inúmeras plantas. Ao mesmo tempo, há um estímulo na produção de enzimas hidrolíticas, como proteínase e peptidase, responsáveis pelo processo de envelhecimento.

Pigmentos fotossintéticos – A descoloração de folhas é o sinal mais evidente do efeito de imissões ácidas na vegetação. Tais alterações podem ser analisadas cromatograficamente ou com espectrofotômetro (usando extratos com acetona ou outros solventes, e comprimentos de onda entre 645 e 663 nm). Alterações no teor de clorofila já

foram observadas por vários autores em líquens e em plantas superiores (Steubing et alii, 1974; Schubert, 1991; Iqbal et alii, 1996). Redução ou incremento no teor de clorofila, degradação de clorofila a e b, incremento no teor de feofitina são reações observadas como conseqüência do efeito de diferentes poluentes, como o SO₂, por exemplo. O parâmetro clorofila, em conexão com a avaliação do efeito de imissões atmosféricas, é problemático em função da sua falta de especificidade: ele pode variar a depender do tipo de poluente, da espécie vegetal, da fase de desenvolvimento do vegetal, da composição atmosférica, etc. O comportamento clorofila a/b é muito utilizado como um índice de avaliação. Entretanto, ele parece ser mais significativo com poluentes em concentrações muito elevadas (Schubert, 1991).

Proteínas, aminoácidos, poliaminas – A determinação da concentração de proteínas solúveis na avaliação da ação de estressores na vegetação é um parâmetro que pode funcionar na bioindicação. Como motivos das alterações na concentração das proteínas, podem ser citados a redução na síntese de novo e/ou o aumento na quebra de aminoácidos (Lambers, 1998). A identificação de alterações na concentração de proteínas de estresse e seus metabólitos é uma possibilidade de se reconhecer precocemente danos nos vegetais. Os vegetais podem reagir, produzindo novos tipos de proteínas, como resultado de expressão genética diferenciada. Plantas superiores acumulam o aminoácido prolina em situação de estresse (estresse hídrico, SO₂, salinidade, etc.). A prolina é uma “substância compatível”, ou seja, substância osmoticamente ativa que, mesmo em concentrações elevadas, não influencia a atividade de enzimas citoplasmáticas, tendo por isso uma reação de proteção. A alanina é acumuladora e tem sua produção elevada, em alguns vegetais, em situação de estresse. Poliaminas como a putrecina, espermidina e espermina são usadas na avaliação do efeito de ozônio. Putrecina, em situação de estresse, acumula-se. Essa estrutura fortemente básica deve ter alguma função protetora, que leva à estabilização de determinadas macromoléculas, equilíbrio iônico e regulação de pH.

Fitormônios – Os fitormônios participam de processos de envelhecimento, mas também de reações resultantes da ação de estressores antrópicos. Ácido abscísico é um fator de envelhecimento típico, que tem sua concentração aumentada em situações de seca, salinidade, estresse osmótico, deficiência nutricional, etc. Etileno é

outro hormônio que, além de participar dos processos de amadurecimento e envelhecimento, como queda de folhas e frutos, possivelmente sofre influência de estressores antrópicos, uma vez que já se observou aumento na sua concentração em situação de estresse (Schubert, 1991). Tratamentos com etileno induzem sintomas de estresse. Já foi observado que estressores provocam aumento de etileno e ácido abscísico e queda na concentração de citoquinina. A relação entre estresse e metabolismo hormonal não é bem conhecida. Reconhece-se, entretanto, que plantas submetidas a estresse mostram sintomas de envelhecimento precoce.

Enzimas – Algumas enzimas funcionam como indicadoras da influência de estressores antropogênicos. Reações bioquímicas e fisiológicas a estressores podem ser monitoradas através de alterações da atividade de determinadas enzimas, como peroxidase, glucosidase e amilase (Iqbal et alii, 1996). Normalmente, estressores em baixas concentrações estimulam a atividade enzimática. Em elevadas concentrações ocorre a inibição da atividade. Perturbações no metabolismo em nível enzimático provocam, entre outras reações, redução no teor de proteínas, como consequência da redução na sua síntese ou na decomposição acentuada. Como resultado tem-se uma liberação reforçada de aminoácidos. Nesse caso, há um acréscimo das enzimas responsáveis pelo metabolismo dos aminoácidos. Os aminoácidos são rapidamente convertidos em prolina ou glutamina. Alterações na atividade enzimática dependem da concentração do estressor e das condições ambientais locais.

Acúmulo de substâncias tóxicas – As substâncias tóxicas absorvidas pelos organismos podem ser transformadas (ozônio), incorporadas (NO_x , SO_2) ou acumuladas (metais pesados) no decorrer do metabolismo. Em situação de normalidade, a maioria dessas substâncias ocorrem em concentrações bem baixas, como os micronutrientes (metais pesados) ou o cloro. O acúmulo delas pode ser usado como um indicador de poluição ambiental. A determinação de enzimas (como a esterase, malatodehidrogenase e peroxidase) ou outro componente bioquímico pode funcionar como parâmetro na avaliação da influência de metais pesados no estresse vegetal.

Metabolismo mineral – O estado nutricional do vegetal pode influenciar direta ou indiretamente o efeito de estressores. Vegetais bem nutridos são menos sensíveis ao estresse provocado pelo SO_2 ,

por exemplo (Iqbal et alii, 1996). Dos sais que provocam estresse (como o NaCl , CaCl_2 e MgCl_2), o cloreto deve receber a maior importância, uma vez que o íon Cl^- interfere significativamente no transcurso de processos fisiológicos. O estado de deficiência mineral pode ser induzido também através de alterações da atividade de determinadas enzimas. Essas alterações podem ser, por sua vez, resultantes da ação de estressores.

Uma vez que o estado nutricional do vegetal interfere na sua resposta ao estressor, a influência que substratos padronizados e soluções nutritivas usados nas metodologias de biomonitoramento do ar podem exercer nas respostas dos vegetais não pode ser negligenciada no momento da interpretação dos resultados. Evidentemente que se faz necessário padronizar o experimento. Usar o substrato proveniente de cada ponto de observação traria dificuldades de interpretação ainda maiores.

Carboidratos – Alterações na concentração de carboidratos já foram observadas em programas de avaliação de impacto ambiental, especialmente no estudo do efeito de estresse provocado pelo SO_2 . Concentrações mais elevadas de carboidratos devem ser vistas, em princípio, como um mecanismo protetor do metabolismo vegetal. Por isso, a determinação de carboidratos, mesmo que na forma de carboidratos totais, tem sido empregada como parâmetro no biomonitoramento da qualidade ambiental.

Lipídeos – Em situação de poluição atmosférica, observaram-se alterações na composição de ácidos gordos. Especialmente a miristina e a palmitina apresentaram redução na concentração em *Taxus baccata* (Schubert, 1991), enquanto ácidos gordos insaturados, como ácido linoleico e ácido linolênico aumentaram significativamente suas concentrações. Em folhas de tabaco foi observado aumento na concentração de ácido linolênico como fator de estresse.

Estrutura morfológica e a bioindicação

Na história da bioindicação, reações morfológicas de vegetais a influências antrópicas foram reconhecidas precocemente. Já em meados do século XIX, na região belgo-inglesa, próxima de uma fábrica de soda, foram observados danos provocados pelas emissões

(Schubert, 1991). Stöckhard (1850) publicava suas observações sobre danos em pinheiros provocados por emissões atmosféricas. Atualmente, danos visíveis provocados por emissões são conhecidos e reconhecidos em toda cidade industrial, a não ser que medidas de controle das emissões já tenham sido adotadas.

Alterações morfológicas em plantas superiores são sintomas usados na bioindicação, em função da facilidade do trabalho e descomplicação na identificação e avaliação das alterações. Não são necessários laboratórios especializados. Diferentes indicadores morfológicos para diferentes fatores de estresse já foram testados, de forma que é possível realizar uma indicação a longo ou curto prazos, com concentrações baixas ou elevadas de poluentes.

Muitos trabalhos já foram e continuam a ser realizados, concentrando-se na padronização de indicadores, na definição da infra-estrutura necessária ao desenvolvimento da pesquisa e na avaliação dos resultados sobre o efeito da combinação de diferentes poluentes e a influência de fatores paralelos. Em alguns países, os indicadores morfológicos são usados em uma rede de monitoramento nacional. Na Holanda, essa rede funciona desde 1969 (Posthumus, 1982); no Japão, desde 1973; na Alemanha, desde início dos anos 70 (Arndt et alii, 1987). Na Califórnia, já em 1955, foi realizado um programa que buscava a comprovação de danos provocados por *smog* fotoquímico em pomares, árvores frutíferas e ervas daninhas (Guderian, 1985).

Alterações morfológicas usadas na bioindicação

Alterações macroscópicas

Clorose – A descoloração de folhas é considerada como reação não específica a diferentes estressores: coloração amarelada nas bordas ou em determinada região da folha (normalmente provocada por emissões contendo cloro); coloração avermelhada, em forma de manchas (comumente associada a emissões ricas em SO_2); coloração amarronzada ou bronzeada (caracterizando um estágio anterior à apresentação de necroses); coloração prateada (facilmente atribuída à presença de ozônio). A descoloração de musgos de troncos de árvores ou líquens, que ficam expostos no caule de árvores, é muito usada como parâmetro no monitoramento ativo da poluição do ar.

Necrose – A avaliação quantitativa da necrose é feita estimando-se o percentual da área foliar atingida. O percentual do tecido morto é usado como um indicador de danos. Às vezes, a necrose é bem específica a um determinado poluente. Necrose em forma de pontos ou de manchas é observada como reação de bioindicadores como o tabaco, variedade Bel-W3; *Urtica urens*, *Begonia semperflorens* e *Phaseolus vulgaris* ao ozônio. Podem ser diferenciados os seguintes tipos de necrose: necrose intercostal, quando se refere à morte do tecido entre as nervuras, freqüentemente provocada pela presença de SO_2 ; necrose lateral, bem característica nos bordos das folhas; necrose acicular, com ocorrência freqüente em pinheiros, que apresentam necroses marrom-escuro nas extremidades. Esse dano visível é associado à presença de SO_2 . Necrose em frutos, como consequência de estresse provocado pela presença de SO_2 , também já foi observada. Antes da necrose se manifestar, normalmente se observa uma descoloração das folhas para verde-escuro, quando o agente estressor é o SO_2 ; em forma de manchas com brilho metálico, quando o estressor é o ozônio. Os sais de cloro provocam a clorose antes da necrose.

Queda foliar – Geralmente ocorre após o aparecimento de necrose ou clorose. A queda foliar significa uma limitação da área de assimilação, inibindo o crescimento. A idade da folha pode ser determinada, marcando-se a folha e observando-a periodicamente.

Alterações de órgãos – Forma anormal de folhas após radiação ou outro estresse; redução ou aumento da configuração das flores, alteração dos órgãos reprodutivos, mudança de sexo e outras anomalias, posição e número de galhos, forma da copa, crescimento foliar e radicular anormais, baixa na taxa de fertilidade e redução no desenvolvimento de pólen são algumas das reações a estressores já observadas. Geralmente, as alterações não são específicas a determinado poluente ou existe dificuldade em associar o efeito a um poluente específico, quando não se tratar de experimentos controlados. Alongamento de acículas em pinheiros em função de compostos nitrosos (proximidade de fábrica de fertilizante, por exemplo), bem como encurtamento provocado por SO_2 já foram observados. Redução do tamanho da folha em regiões submetidas a emissões industriais ácidas é comumente reportado em programas de biomonitoramento do ar.

Alterações microscópicas – A utilização de alterações no nível anatomocitológico na indicação precoce de estresse ambiental não tem sido muito bem-sucedida. Na maioria das vezes, as alterações microscópicas apareceram ao mesmo tempo que as macroscópicas, que são mais facilmente estudadas. Por isso, alterações estruturais microscópicas quase não são usadas na bioindicação. A anatomia, entretanto, contribuiu no esclarecimento do processo da formação de necroses, e possibilita reconhecer estruturas morfológicas que podem ser usadas como indicadores de reação do vegetal a situação de estresse. Alguns exemplos são: alterações no tamanho da célula, como a redução no tamanho das células da epiderme foliar; alterações de estruturas subcelulares, como a tumefação de tilacóides, em consequência de estresse provocado pelo SO_2 ; destruição do sistema de membranas do cloroplasto; formação de estruturas cristalinas no cloroplasto, a exemplo de feijoeiros expostos a emissões ricas em compostos clorados; granulação do plasma e liquefação de cloroplastos em árvores estressadas por imissões ricas em SO_2 e Cl; solubilização do plasma da parede celular em consequência da ação de ácidos como o SO_2 ; alteração do grau xeromórfico foliar, resultando na alteração do número de estômatos, espessura cuticular, pêlos, espessura foliar, grau de suculência (relação peso fresco/peso seco) e, entre outros exemplos, a estrutura da madeira, como o desaparecimento do anel anual são características que podem ser empregadas na avaliação da qualidade ambiental.

Problemas na avaliação de alterações morfológica

Existem algumas especificidades inerentes ao vegetal que podem dificultar o uso de alterações morfológicas como parâmetro na bioindicação da qualidade ambiental. A disponibilidade de pessoal experiente pode reduzir os riscos de se atribuir erradamente certas características “normais” a efeitos de ações antropogênicas. É importante distinguir entre influências climáticas, do solo, estágio de desenvolvimento, estágio nutricional, influência da estação do ano, etc., de influências antropogênicas. Essa preocupação tem validade não somente quando se tratar da observação de alterações morfológicas, mas qualquer outro tipo de resposta do biomonitor/bioindicador que esteja sendo observada. Para que as informações fornecidas pelos

biomonitoros sejam realmente confiáveis e conclusivas, faz-se necessário excluir a possibilidade de que tais respostas sejam provenientes de alterações “normais” ante o comportamento de fatores ambientais. Uma série de fatores locais podem provocar sintomas semelhantes àqueles provocados por estressores antropogênicos. Deve-se considerar, por exemplo, que a ocorrência de pragas e doenças podem provocar tais sintomas, a não ser que a influência antropogênica tenha alterado a elasticidade do sistema, facilitando a ocorrência de pragas e doenças. Somente informações sobre o histórico da área em avaliação pode esclarecer essa situação.

Existe uma sensibilidade diferenciada de alguns vegetais; a depender da idade (estágio de desenvolvimento) do vegetal: o rabanete é mais sensível ao SO_2 com folhas ainda jovens. Na fase mais adulta, o efeito do SO_2 é reduzido a 12%. Cereais, ao contrário, são mais sensíveis quando mais velhos. O período do dia e a época do ano exercem influência na intensidade do metabolismo, especialmente quando se tratar do efeito de SO_2 . Durante o dia as folhas são mais sensíveis. Pinheiros mostram-se mais sensíveis a emissões atmosféricas durante a primavera e o verão do que no outono e inverno. Existem diferenças individuais e predisposição; aqui é importante a realização de testes que assegurem o resultado intencionado. Pode acontecer que o bioindicador se adapte ao estressor e, com isso, apresente uma falsificação nos resultados. Daí a importância de se usar vários indivíduos nos experimentos.

A diversidade de fatores que podem influenciar as respostas dos vegetais deixa claro que não é possível conclusões absolutamente quantitativas em trabalhos que abordem aspectos morfológicos de respostas a estressores. Mais importante do que a descoberta de novos indicadores e novos sintomas é a padronização, que possibilita a comparação dos resultados e a reprodutibilidade do experimento. Mais importante do que a exatidão do indicador é a confiabilidade, ou seja, uma avaliação crítica da possibilidade de erros.

Biomonitoramento da poluição do ar na Bahia

No final de 1995, foi iniciado um Programa de Biomonitoramento do Ar na região do Pólo Petroquímico de Camaçari-Ba (PPC), uma cooperação entre a Universidade Federal da Bahia e a Cetrel

S.A., Empresa de Proteção Ambiental responsável pelo monitoramento ambiental da região industrial do Pólo Petroquímico de Camaçari. Hortaliças foram cultivadas em casa de vegetação do Instituto de Biologia e expostas nas estações de monitoramento do ar, seguindo metodologias descritas em Arndt (1987). O musgo *Sphagnum sp.*, padronizado internacionalmente, foi utilizado para “validar” os resultados. O objetivo principal do monitoramento realizado durante um ano foi analisar o acúmulo de metais pesados na vegetação. Os dados obtidos com os biomonitores foram compatíveis com os dados provenientes das análises físico-químicas, sendo que os vegetais, especialmente o *Sphagnum sp.*, acumularam concentrações consideravelmente mais elevadas do que as medições físico-químicas. Entre os metais, foram analisados o cobre e o arsênio, que mostraram concentrações mais elevadas nas estações mais próximas de uma indústria beneficiadora de cobre. Além da redução da biomassa observada especialmente no coentro (*Coriandrum sativum*) e no capim-santo (*Cymbopogon citratus*), também foram observados sintomas, especialmente na hortelã (*Plectranthus amboinicus*), como alterações na concentração de amido e necroses escurecidas nas bordas das folhas e prateadas entre as nervuras, tidos na literatura científica como indicadores de impactos provocados pelo SO₂ e ozônio. Outros sintomas, que podem ser considerados indicadores da ação do SO₂ e do ozônio, são observados na vegetação que ocorre naturalmente na região, especialmente aquela próxima à indústria beneficiadora de cobre. Mais recentemente, respostas fisiológicas e bioquímicas de *Phaseolus vulgaris* (feijão, carioquinha) foram empregadas na avaliação dos efeitos das emissões do PPC na vegetação (Fernandes, 1998). Atualmente, a *Mangifera indica* (mangueira) vem sendo utilizada no biomonitoramento passivo das emissões do PPC. O Quadro 1 mostra informações fornecidas por bioindicadores/biomonitores sobre efeitos das emissões atmosféricas na vegetação do PPC.

Quadro 1 – Informações sobre efeitos das emissões atmosféricas do Pólo Petroquímico de Camaçari-BA (PPC) fornecidas por bioindicadores/biomonitores

Bioindicador/ biomonitor	Monitoramento	Conclusões	Fontes
<i>Sphagnum sp.</i> e <i>Coriandrum sativum</i>	Ativo	acúmulo de arsênio proporcional ao input atmosférico	Lima et alii (1997a)
<i>Cymbopogon citratus</i>	Ativo	redução na taxa de desenvolvimento vegetal relacionada ao acúmulo de cobre	Lima et alii (1997b)
<i>Sphagnum sp.</i>	Ativo	o biomonitor acumula sensivelmente mais cobre, níquel e chumbo do que os filtros de <i>Hi-Vol</i>	Lima e Santana (1998)
<i>Cymbopogon citratus</i>	Ativo	as concentrações de cobre analisadas foram evidentemente mais elevadas nas proximidades da indústria beneficiadora de cobre	Klumpp, Domingos e Lima (1998)
<i>Mangifera indica</i>	Passivo	acúmulo de proteínas solúveis totais e prolina, degradação de clorofilas e carotenóides	Almeida et alii (1998)
<i>Plectranthus amboinicus</i>	Ativo	alteração no teor de amido em folhas	Oliveira et alii (1998)
<i>Phaseolus vulgaris</i>	Ativo	alterações no comportamento fisiológico e bioquímico (área foliar, catalase, ácido ascórbico, proteínas solúveis totais, concentração de S e N, amido)	Fernandes (1999)

Referências bibliográficas

- ALMEIDA, V. S.; LIMA, J. S.; QUEIROZ, A. F. S.; ARGOLO, J. L. e SOUZA, H. C. (1998). Utilização de *Mangifera indica* L. como bioindicadora de poluição atmosférica na região do Pólo Petroquímico de Camaçari-BA: efeitos fisiológicos. I CONGRESSO NACIONAL DE MEIO AMBIENTE NA BAHIA. Feira de Santana, BA. *Anais*. Salvador, Espaço Cultural Expogeo.
- ARNDT, U. (1974). The Kautsky-Effect: a method for investigation of the actions of air pollution in chloroplasts. *Environm. Pollution*, n. 6, pp. 181-194.
- ARNDT, U.; NOBEL, W. e SCHWEIZER, B. (1987). *Bioindikatoren: Möglichkeiten, Grenzen und neue Erkenntnisse*. Stuttgart, Ulmer.
- ARNDT, U.; FOMIN, A. e LORENZ, S. (1996). "Zusammenfassung und Fazit des Workshops". In: *I. Hohenheimer Workshop zur Bioindikation am Kraftwerk Altbach-Deizisau 1995*. Ostfildern, Heimbach.
- DÄSSLER, H. G. (1991). *Einfluss von Luftverunreinigungen auf die Vegetation – Ursachen-Wirkungen-Gegenmassnahmen*. Jena, Fischer.
- ERNST, W. H. O. (1993). "Geobotanical and biogeochemical prospecting for heavy metal deposits in Europe and Africa". In: MARKERT, B. *Plants as biomonitors: indicators for heavy metals in the terrestrial environment*. Weinheim, VHC.
- FERNANDES, E. B. e LIMA, J. S. (1998). Respostas fisiológicas em *Phaseolus vulgaris* L. cv. "Carioquinha" submetido a fumigação com SO. IV CONGRESSO DE ECOLOGIA DO BRASIL, *Anais*. Belém, PA.
- GUDERIAN, R.; TINGEY, D. T. e RABE, R. (1985). Effects of photochemical oxidants on plants. *Ecological Studies (Air pollution by Photochemical Oxidants)*, v. 52. Berlin, Springer, pp. 127-346.
- HÄRTEL, O. (1976). Wie lassen sich Pflanzenschäden definieren? *Umschau*, n. 76, pp. 347-348.

- IQBAL, M.; ABDIN, M. Z.; YUNUS, M. e AGRAWAL, M. (1996). "Resistance mechanisms in plants against air pollution". In: YUNUS, M. e IQBAL, M. (ed.). *Plant response to air pollution*. Chichester, John Wiley & Sons Ltd.
- KELLER, T. (1977). Begriff und Bedeutung der latenten Immissionschädigung. *Allgemeine Forst-Jagdztg*, n. 148, pp. 115-120.
- KLUMPP, A.; DOMINGOS, M.; MORAES, R. M. e LIMA, J. S. (1999). "Use of subtropical and tropical plant species as bioindicator of air pollution in the vicinity of industrial complexes in Brazil". In: ARNDT, U.; BRECKLE, S.W. e SCHWEIZER, B. (eds.). *Ökologische Forschungen ausserhalb Europas*. 1. A.F.W/Schimper-Symposium, Hohenheim, 14-16/10/1998. Heimbach Verlag, Ostfildern (no prelo).
- LAMBERS, H.; CHAPIN, F. S. e PONS, T. L. (1998). *Plant physiological ecology*. New York, Springer.
- LIMA, J. S. e SANTANA, D. L. (1998). *Sphagnum* sp no biomonitoramento da poluição atmosférica no Pólo Petroquímico de Camaçari-BA. IV CONGRESSO DE ECOLOGIA DO BRASIL, *Anais*. Belém, PA.
- LIMA, J. S.; CARVALHO FILHO, D. M.; COUTO, E.; SANTANA, D. L. e SOUZA, H. C. (1997a). Comparação entre o coentro e o *Sphagnum* sp. como bioacumuladores do arsênio no Pólo Petroquímico de Camaçari-BA. *Revista Brasileira de Ecologia*. v. 1, n. 1, pp. 91-94.
- LIMA, J. S.; CARVALHO FILHO, D. M.; COUTO, E.; KORN, M. G. A.; MELO, M. H. e GOMES, R. C. T. (1997b). Capim-Santo (*Cymbopogon citratus*) como bioindicador de poluição atmosférica no Pólo Petroquímico de Camaçari – BA. *Revista Brasileira de Ecologia*, v. 1, n. 1, pp. 95-98.
- MARKERT, B. (1993). *Plants as biomonitors: indicators for heavy metals in the terrestrial environment*. Weinheim, VHC.
- MÜLLER, P. (1980). *Biogeography*. Stuttgart, Ulmer.
- OLIVEIRA, S. S.; GUSMÃO, E. F.; SILVA, L. B. e LIMA, J. S. (1998). Estudos preliminares sobre a anatomia foliar de

- Plectranthus* CF. *amboinicus* LOUR (hortelã grosso) sob efeitos de poluentes atmosféricos (metais pesados) do Pólo Petroquímico de Camaçari-BA. CONGRESSO NACIONAL DE BOTÂNICA, *Resumos*. Salvador, BA.
- POSTHUMUS, A. C. (1982): "Morphological symptoms and yield alterations as criteria of evaluation in the monitoring of effects of air pollutants with plants". In: STEUBING, L. e JÄGER, A. (eds.). *Monitoring of air pollutants by plants*. Hague, Junk Publishers.
- RABE, R. (1982). Der Nachweis von Luftverunreinigungen und ihrer Wirkungen durch Bioindikatoren. *Forum Städte-Hygiene*, n. 33, pp. 15-21.
- SCHREIBER, U.; VIDAVER, W.; RONECKELS, V. C. e ROSEN, P. (1978). Chlorophyll fluorescence essay for ozone injury in intact plants. *Plant Physiology*, n. 61, pp. 80-84.
- SCHUBERT, R. (1991). *Bioindikation in terrestrischen Ökosystemen*. Stuttgart, Fischer Verlag.
- SCHLEE, D. (1981). Ökologische Biochemie – Aufgaben und Möglichkeiten zwischen Ökologie und Biochemie. *Biol. Rundsch.*, n. 19, pp. 189-204.
- SORAUER, P. e RAMANN, E. (1899). Sogennante unsichtbare Rauchbeschädigungen. *Bot. Zbl.*, n. 80, pp. 251-262.
- STEUBING, L.; KLEE, R. e KIRSCHBAUM, U. (1974). Beurteilung der lufthygienischen Bedingungen in der Region Untermain mittels und höherer Pflanzen. *Staub*, n. 34, pp. 206-209.
- STEUBING, L. (1982): "Problems of Bioindikation and the necessity of standardization". In: STEUBING, L. e JÄGER, A. (eds.). *Monitoring of air pollutants by plants*. Hague, Junk Publishers.
- ____ (1985). Pflanzen als Bioindikatoren für Luftverunreinigungen. *Chemie in unserer Zeit*, n. 15, pp. 42-47.
- STÖCKHARDT, A. (1850). Über die Einwirkung des Rauches der Silberhütten auf die benachbarte Vegetation. *Polytechn. Cbl.*, n. 1850, p. 257.
- THALIUS, J. (1588). *Sylva hercynica, sive catalogus plantarum sponte nascentium in montibus*. Frankfurt am Main.

- VOGL, M.; BÖRTITZ, S. e POLSTER, H. (1965). Physiologische und biochemische Beiträge zur Rauchschadenforschung. *Biolog. Zbl.*, n. 84, pp. 763-777.
- WIELER, A. (1897). Über unsichtbare Rauchschäden bei Nadelbäumen. *Z. Forst u- Jagdwesen*, n. 29, pp. 513-529.
- ____ (1902). Über die Einwirkung des Schwefligen Säure auf Pflanzen. *Ber. Dt. Bot. Ges.*, n. 20, pp. 556-566.
- ZIEGLER, I. (1972). The effect of SO_3 – on the activity of ribulose – 1,5 – diphosphate carboxylase in isolated spinach chloroplasts. *Planta*, n. 103, pp. 155-163.
- ____ (1973). Effect of sulfite on phosphoenolpyruvate carboxylase and malate formation in extracts of *Zea mays*. *Phytochemistry*, n. 12, pp. 1027-1030.

Mário Tomazello Filho
Paulo Cesar Botosso
Claudio Sergio Lisi

Análise e aplicação dos anéis de crescimento das árvores como indicadores ambientais: dendrocronologia e dendroclimatologia

A dendrocronologia é conceituada como a ciência que possibilita a datação dos anéis de crescimento do lenho das árvores e das peças de madeira, incluindo a aplicação das informações registradas em sua estrutura para estudos ambientais e históricos (Kaennel e Schweingruber, 1995).

A existência dos anéis de crescimento tem sido verificada há muito tempo, desde as primeiras observações, feitas na Grécia antiga. Leonardo da Vinci, no século XVI, reconheceu em árvores de *Pinus*, na Toscana, Itália, a relação entre os anéis de crescimento e o clima, relatando que “os anéis de crescimento mostram o número de anos das árvores e, de acordo com a sua espessura, os anos mais e os menos secos, sendo que os anéis são mais espessos na região norte do que no sul do país” (Corona, 1986). No entanto, considera-se que a dendrocronologia, como ciência, teve seu início na Alemanha, com os trabalhos sistemáticos de Theodor e Robert Hartig, em meados do século XIX, de Bruno Huber, em meados do século XX, e nos EUA com Andrew E. Douglass, a partir do início do século XX, ao publicar o livro *Climatic cycles and tree growth*. A partir da década de 70, inúmeros livros sobre dendrocronologia foram elaborados por pesquisadores da Europa e da América do Norte, com destaque para H. C. Fritts com *Tree rings and climate* (1976) e F. H. Schweingruber com *Tree rings – basics and applications of dendrochronology* (1987) e *Tree rings and environment ecology* (1996), além do *Multilingual glossary of dendrochronology*. Ar-

tigos científicos têm sido publicados nas revistas *Tree Ring Bulletin and Dendrochronology*, editadas a partir de 1935 e 1983, respectivamente, e em outras, como *IAWA Journal*, *Bois et Forêts des Tropiques*, *Ecology*, *Journal of Forestry*, etc. Anualmente, são programadas inúmeras atividades relacionadas com a dendrocronologia – congressos, seminários, *workshops* –, além da tradicional Semana de Campo de Dendroecologia, na Europa e nos EUA. No Brasil, a 1ª Semana de Dendroecologia foi realizada em 1998, na ESALQ/USP - Campus de Piracicaba, com a participação de treze pesquisadores de diferentes instituições brasileiras.

Atualmente, as pesquisas e atividades nas diferentes áreas da dendrocronologia encontram-se em pleno desenvolvimento nos laboratórios de anéis de crescimento das instituições de pesquisa de inúmeros países. Na América do Sul, citam-se a Argentina (Laboratório de Dendrocronologia, Cricyt, Mendoza), Chile (Laboratório de Anéis de Crescimento, Universidade Austral do Chile, Valdivia e Universidade do Chile, Santiago) e Brasil (Laboratório de Anéis de Crescimento, Esalq, Universidade de São Paulo, Embrapa, Universidade Federal do Paraná, Instituto Nacional de Pesquisas da Amazônia, dentre outras) (Tomazello F^o, 1995).

As espécies florestais e a dendrocronologia

A árvore como integradora dos fatores ambientais e aspectos da formação dos anéis de crescimento

Segundo Fritts (1976) e Schweingruber (1987), as árvores, como seres vivos estacionários, têm os seus componentes (raízes; copa, tronco, etc.) reagindo com os fatores ambientais. Dessa forma, enquanto algumas partes das árvores recebem os “sinais ambientais”, outras reagem aos mesmos. As árvores de vida longa, como os *Pinus longaeva* (*P. aristata*), integram esses fatores ambientais por períodos de até 4.900 anos (Currey, 1965); e as de vida curta, como os *Schizolobium parahybum*, restringem-se a somente 20-30 anos. Essa habilidade de integração é refletida em inúmeras características das árvores, como a distribuição geográfica, forma da copa, formação dos anéis de crescimento, etc. Durante o longo processo evolutivo, as árvores se desenvolveram em diferentes sítios, sendo, nesse

caso, melhor adaptadas para as condições específicas de cada local. As árvores têm mostrado uma reação às variáveis ambientais (temperatura, precipitação, etc.) que afetam seus inúmeros processos fisiológicos (respiração, fluxo de seiva, transpiração, etc.) refletindo na atividade cambial e na formação dos anéis de crescimento. Portanto, as variáveis ambientais que afetam as árvores são registradas nos seus anéis de crescimento, que expressam os eventos ocorridos no passado e no ano corrente (Figuras 1 e 2).

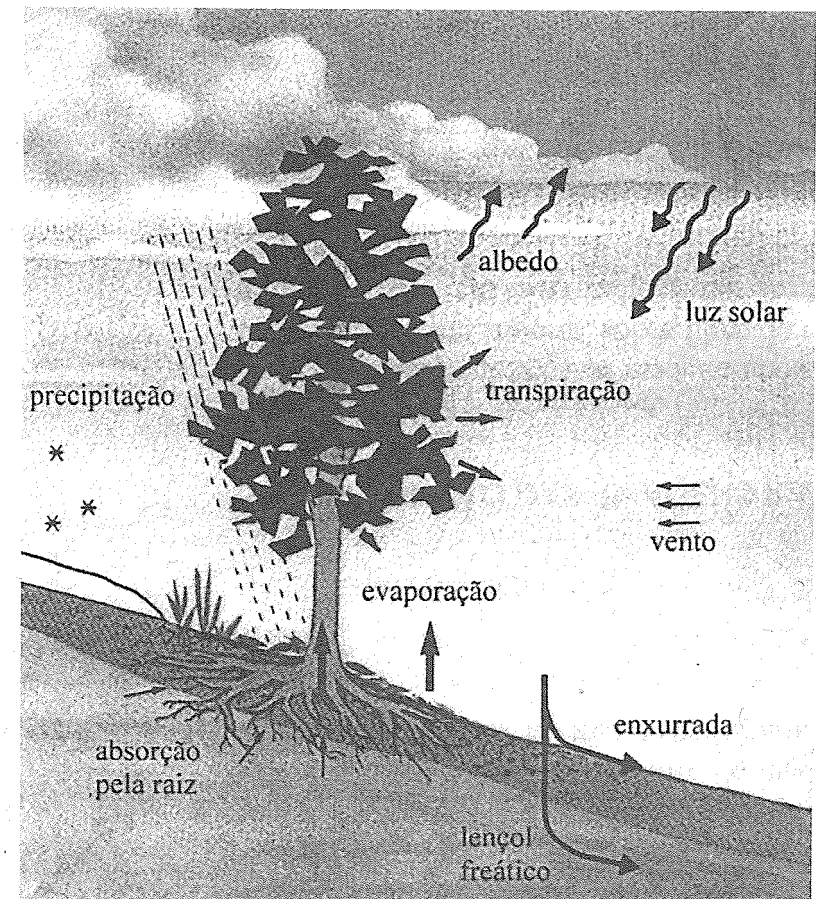


Figura 1 – A árvore como integradora dos “sinais climáticos” e reagindo aos fatores ambientais (Schweingruber, 1987)

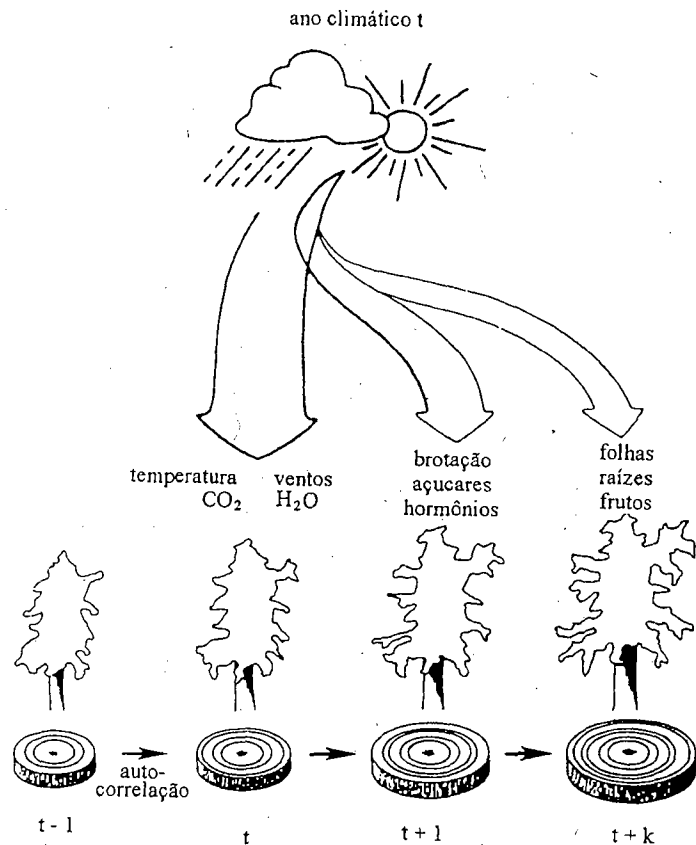


Figura 2 – A reação das árvores pode ser analisada pelos seus anéis de crescimento. As condições climáticas do ano t afetam a espessura do anel de crescimento do mesmo ano t , podendo afetar a espessura do anel de crescimento formado no ano $t+1$ e de um número $t+k$ de anos. Dessa forma, a espessura do anel de crescimento do ano $t-1$ é estatisticamente relacionada com a do ano t , sendo esse efeito modelado como autocorrelação de espessura de anel de crescimento (Fritts, 1976)

A atividade cambial das árvores e, em consequência, a formação dos anéis de crescimento, é influenciada pelo seu genótipo (crescimento, forma, longevidade, sensibilidade dos anéis de crescimento

e da estrutura anatômica da madeira, etc.), fatores bióticos (associações com micorrizas, microorganismos patogênicos, etc.) e abióticos (luz, temperatura, água, nutrientes, vento, poluição do solo, do ar, fogo, etc.). Um modelo teórico relaciona o efeito das variáveis climáticas mais importantes (precipitação e temperatura) com os processos fisiológicos (respiração, fotossíntese, fluxo de seiva orgânica e taxa de divisões celulares) e com a formação dos anéis de crescimento das árvores, que se constituem no produto final de uma complexa cadeia de eventos (Figura 3).

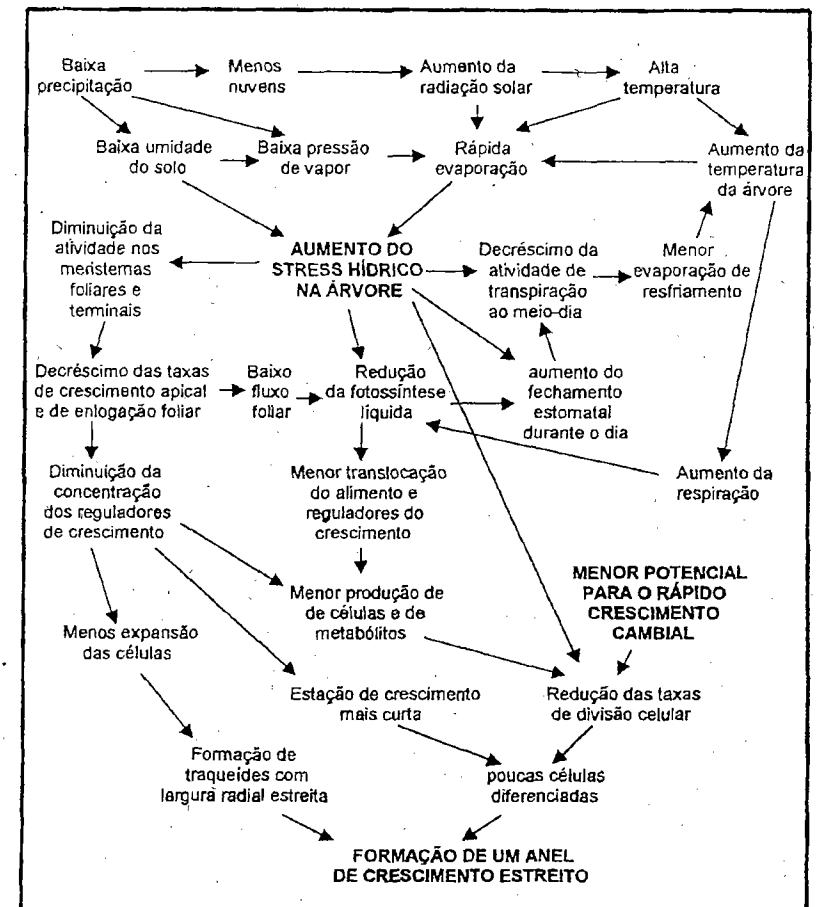


Figura 3 – Relação entre as variáveis climáticas, os processos fisiológicos e a formação dos anéis de crescimento das árvores (Fritts, 1976)

Um modelo simplificado descreve os mais importantes processos fisiológicos, mostrando as inter-relações dos fatores ambientais, do suprimento de nutrientes e dos reguladores do crescimento no crescimento da raiz e do tronco e na atividade cambial das árvores (Figura 4), de forma complementar a outros modelos apresentados na literatura (Figura 5).

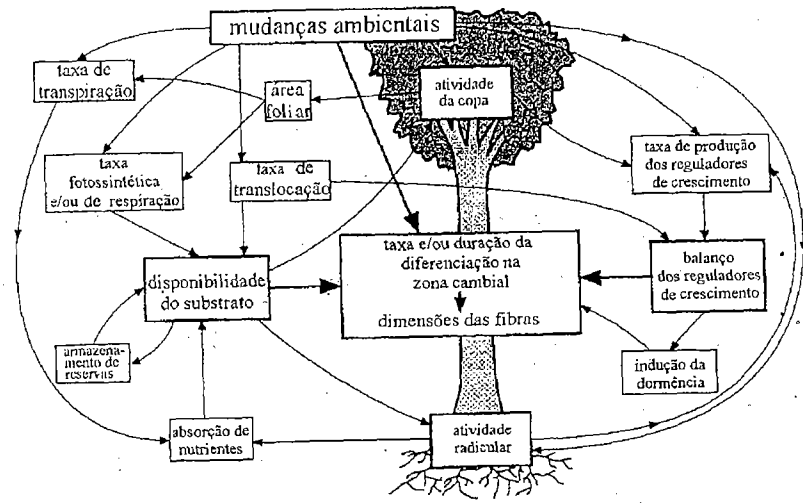


Figura 4 – Relação entre fatores ambientais com o crescimento e a atividade cambial das árvores (Denne e Dodds, 1981)

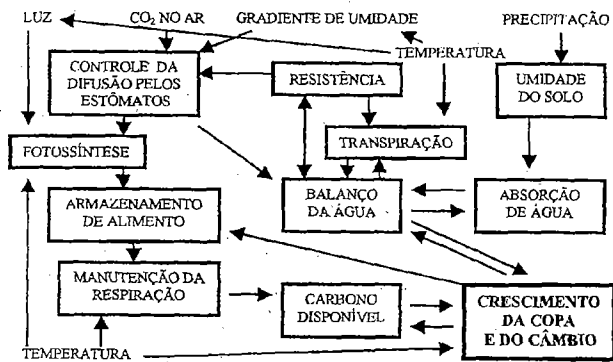


Figura 5 – Efeito dos fatores climáticos nos processos fisiológicos das árvores e sua relação com a atividade cambial e formação dos anéis de crescimento (Fritts e Shashkin, 1995)

O crescimento em altura e diâmetro do tronco das árvores de coníferas e o papel desempenhado pelos fatores endógenos e exógenos são apresentados na Figura 6. O sentido medula-casca (direção 1), indica o processo de envelhecimento do câmbio influenciado por uma série de condições ecológicas; o sentido topo-base (direção 2), paralelo aos anéis de crescimento próximos à casca, indica o câmbio com diferentes idades fisiológicas (mais velho na base e mais jovem no ápice do tronco) sob a influência das mesmas condições ecológicas; o sentido topo-base (direção 3), paralelo à medula, indica o câmbio jovem sob a influência de uma série de condições ecológicas.

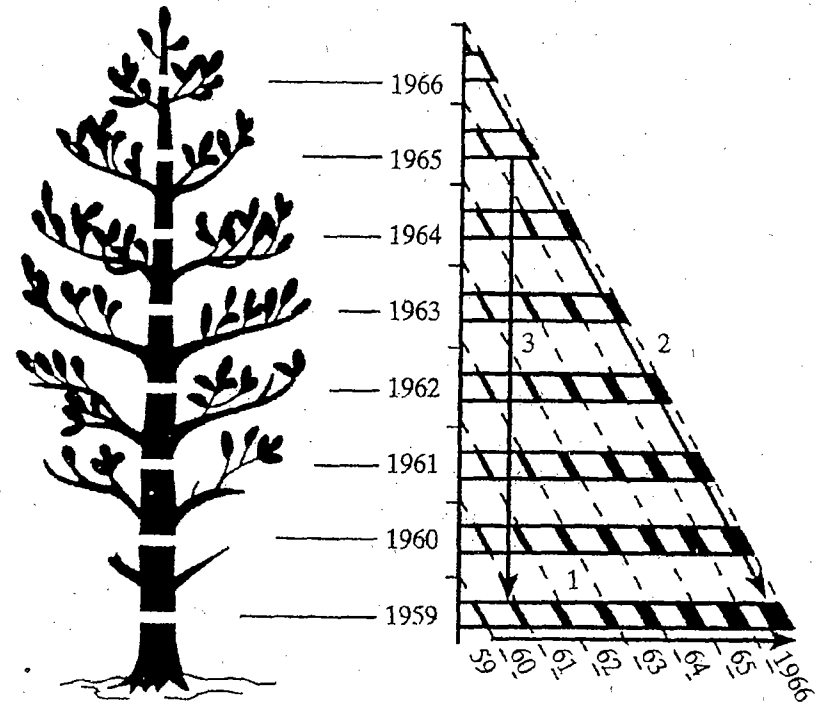


Figura 6 – Árvore de conífera, com destaque para as seções transversais a diferentes alturas do tronco, evidenciando a idade de formação dos anéis de crescimento anuais (Duff e Nolan, 1957; Wimmer, 1994)

Coníferas (gimnospermas) e folhosas (angiospermas dicotiledôneas)

As coníferas (gimnospermas) são constituídas atualmente por 675 espécies em 63 gêneros, tendo surgido há cerca de 400 milhões de anos, no período Devoniano da era Paleozóica. O termo gimnosperma é originário do grego e significa plantas com sementes (*sperma*) nuas (*gymnos*), indicando a existência de óvulos nus inseridos na superfície do macrosporófilo e ausência de um fruto verdadeiro. Essas plantas formam geralmente florestas relativamente homogêneas com relação à composição de espécies, denominadas hábito gregário, em função da polinização pelo vento (anemófila). Citam-se as florestas de *Pinus*, *Larix* e *Picea* no hemisfério Norte e de *Araucaria angustifolia*, pinheiro-brasileiro, *A. araucana*, *Fitzroya cupressoides* e *Podocarpus* spp no hemisfério Sul. As árvores apresentam um crescimento monopodial, com a dominância do meristema apical sobre os demais, formando um fuste retilíneo e copa de forma cônica nos primeiros anos. Com relação à anatomia da madeira, a maior parte das espécies de coníferas apresenta distintos anéis de crescimento anuais, demarcados pelos lenhos inicial e tardio, resultantes da sazonalidade da atividade cambial e demonstrando o seu potencial para estudos dendrocronológicos. As folhosas (angiospermas dicotiledôneas), com cerca de 250.000 espécies, formam a maior divisão do reino vegetal, tendo surgido há cerca de 225 milhões de anos, no período Permiano, da era Paleozóica (ou 160 milhões de anos, no período Triássico, da era Mesozóica, segundo alguns autores), com significativa expansão a partir do Cretáceo, no Mesozóico. Da mesma forma, o termo angiosperma é originário do grego, sendo *angio* (urna, recipiente) e *sperma* (semente), indicando a formação de frutos verdadeiros, com sementes possuindo embrião com 2 folhas cotiledonares. É um dos maiores grupos de plantas, dominando a flora terrestre, especialmente nas condições tropicais e subtropicais. As árvores atingem diâmetro e altura expressivas, com crescimento geralmente simpodial, formando uma copa aberta e intensamente ramificada (Harlow e Harrar, 1969). Com relação à anatomia da madeira, observam-se nas folhosas uma complexidade maior e variação na formação das camadas de crescimento, em função da constituição genética e das fases fenológicas das espécies e das condições ambientais (Figuras 7 e 8).

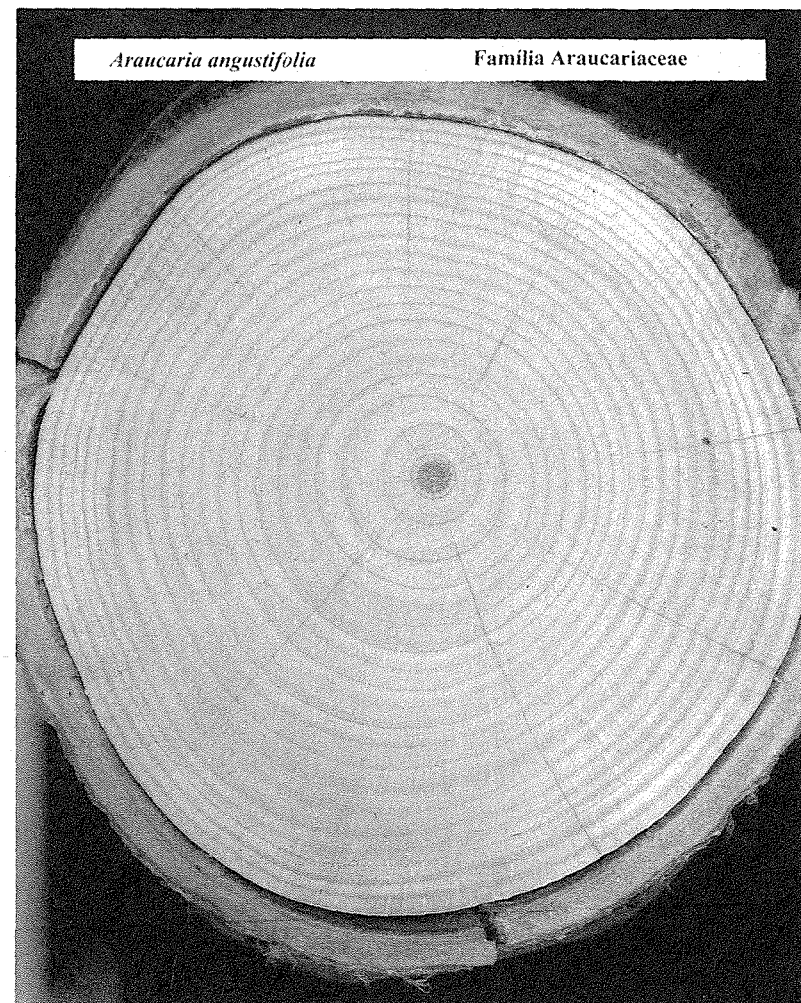


Figura 7 – *Araucaria angustifolia*, pinheiro-brasileiro, Araucariaceae: seção transversal do tronco, evidenciando os anéis de crescimento anuais, caracterizados pelos lenhos inicial e tardio (Lisi, Pessenda e Tomazello F^o, 1998)

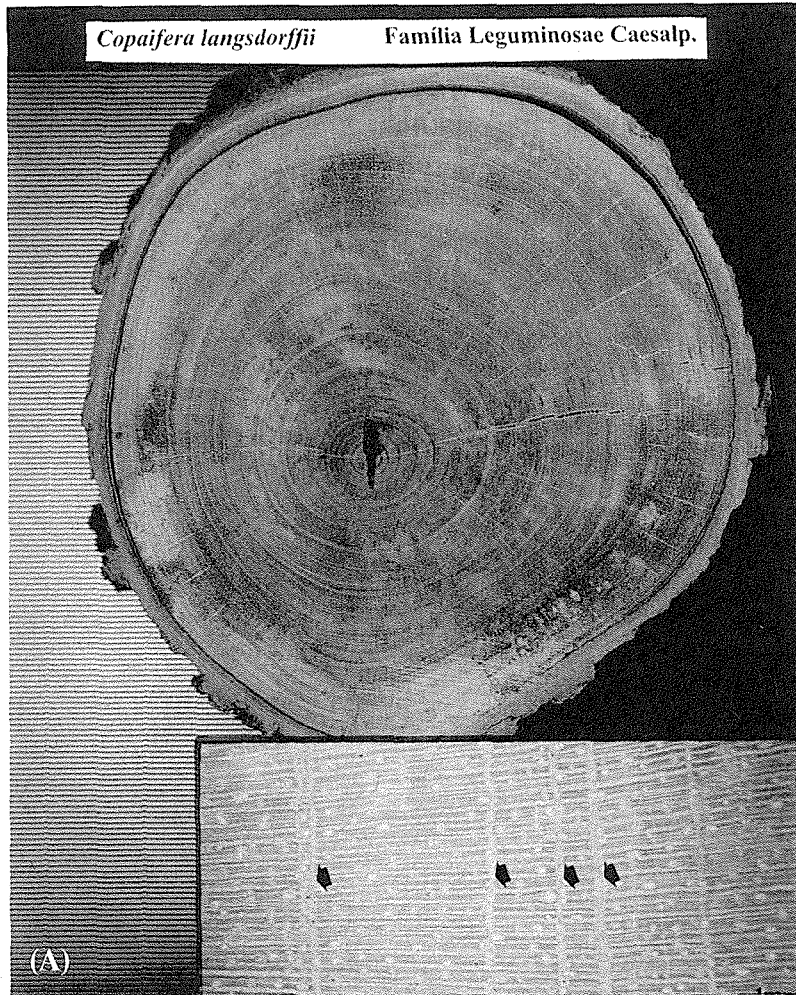


Figura 8a – (A) *Copaifera langsdorffii*, óleo-copaíba e (B) *Hymenaea courbaril*, jatobá, Leguminosae Caesalpinoideae: seção transversal do tronco, evidenciando os anéis de crescimento anuais, caracterizados pelos canais secretores axiais (A) e pelo parênquima terminal (A e B) (Tomazello F^o e Worbes, 1998)

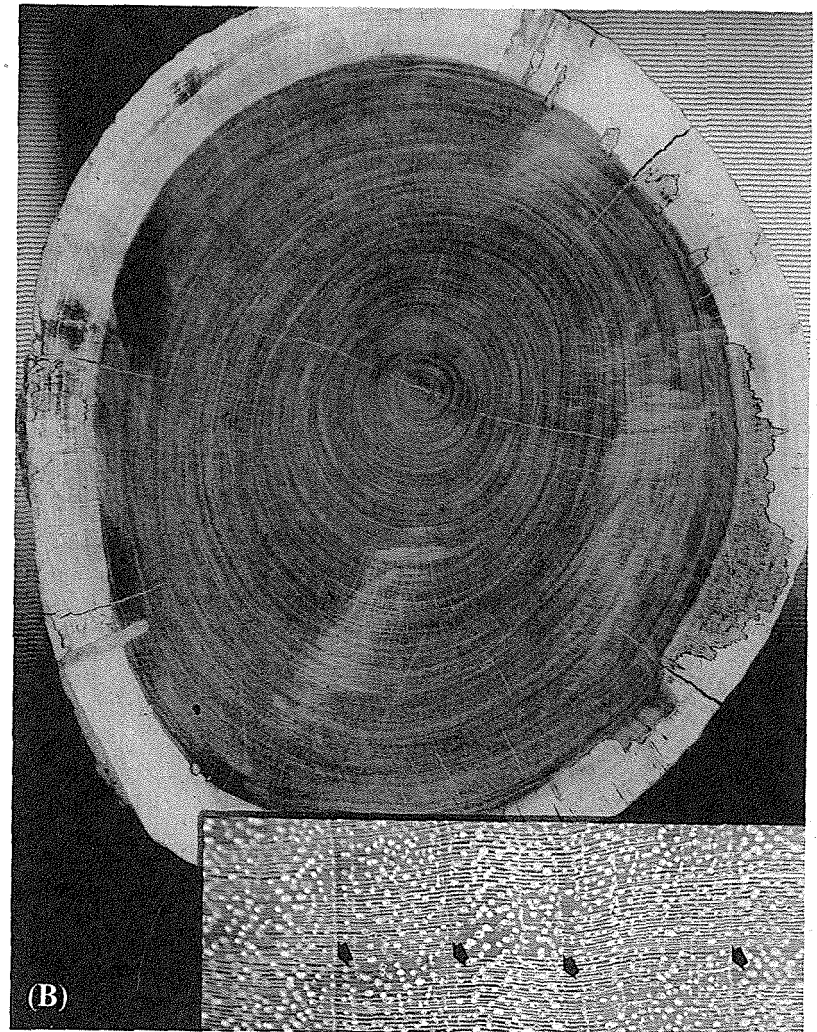


Figura 8b

Folhosas de clima tropical versus temperado

Durante muito tempo constituiu-se quase consenso, entre os pesquisadores, que somente as espécies de folhosas de clima temperado formavam anéis de crescimento anuais. As árvores nas regiões tropicais e subtropicais, ao contrário, não apresentariam sazonalidade da atividade cambial, pelas condições climáticas serem consideradas pra-

ticamente, constantes durante o ano e, portanto, não formariam anéis de crescimento anuais. As primeiras contribuições demonstrando a existência de anéis de crescimento anuais em espécies tropicais foram publicadas por Brandis (1926), na Índia; Coster (1927/28) e Berlage (1931), na Ilha de Java, no final do século XIX e início do século XX; e, posteriormente, por Chowdhury (1939), na Índia; Schulz (1960), no Surinam; Alvim (1964, 1976) no Brasil e Amobi (1973) na Nigéria, dentre outras. O primeiro *workshop* sobre Dendrocronologia Tropical, com o título Age and Growth Rate Determination of Tropical Trees, foi realizado somente em 1980 em Petersham, Massachusetts, EUA (Borman e Berlyn, 1981). Em 1989, durante a Conferência da União Internacional das Organizações de Pesquisas Florestais – Iufro, em São Paulo, foi realizada a Sessão Growth Rings in Tropical Tree Species, com o tema reconhecido como um novo grupo, em 1996 (Baas e Vetter, 1989). Em 1994, na conferência Growth Periodicity in Tropical Trees, em Kuala Lumpur, Malásia, os resultados das pesquisas em dendrocronologia tropical foram apresentados e discutidos pela comunidade científica (Eckstein, Saas e Baas, 1995). Recentemente, em nova reunião da Iufro – Pullmann, EUA –, foram discutidos os avanços nas pesquisas em dendrocronologia, incluindo a sua aplicação em espécies tropicais (Wimmer e Vetter, 1999). Atualmente, os resultados obtidos e publicados em revistas e livros são suficientes para convencer a comunidade científica acerca da sazonalidade e do crescimento rítmico de inúmeras espécies tropicais em diversas condições ecológicas, resultando na formação de anéis anuais de crescimento.

Dendrocronologia: relação com outras ciências e sua divisão em sub-ramos

A dendrocronologia, como ciência pluridisciplinar, atingiu um elevado nível de especialização, importância e aplicação, ao incorporar os conhecimentos e as técnicas de diversas áreas com as quais tem uma estreita conexão, como anatomia e química da madeira, fisiologia das árvores, genética florestal, silvicultura, climatologia, hidrologia, estatística, etc.

Nesse contexto e em função das significativas informações publicadas na literatura especializada, foram sendo gradativamente constituídos sub-ramos da dendrocronologia, sendo, o primeiro, a *dendro-*

arqueologia, que possibilita a datação da madeira ou de objetos de madeira através da análise dos anéis de crescimento anuais. A *dendroecologia*, outro importante sub-ramo da dendrocronologia, inclui as áreas de estudo que aplicam as informações contidas nos anéis de crescimento com a finalidade de analisar a ocorrência de fenômenos ecológicos e ambientais. Dentre elas, destacam-se a utilização dos anéis de crescimento para o estudo e a reconstrução das condições climáticas do passado e do presente (*dendroclimatologia*), o estudo da dinâmica dos recursos hídricos (*dendrohidrologia*), dos processos geomorfológicos (*dendrogeomorfologia*), da dinâmica das geleiras (*dendroglaciologia*). Outras importantes áreas referem-se à avaliação do efeito da neve, dos ventos, dos animais, dos insetos e microorganismos, dos processos tectônicos e das atividades vulcânicas, dos incêndios, da silvicultura, da dinâmica das populações florestais, da presença de metais pesados no ambiente e de ações antropogênicas em geral através dos anéis de crescimento anuais (Figura 9).

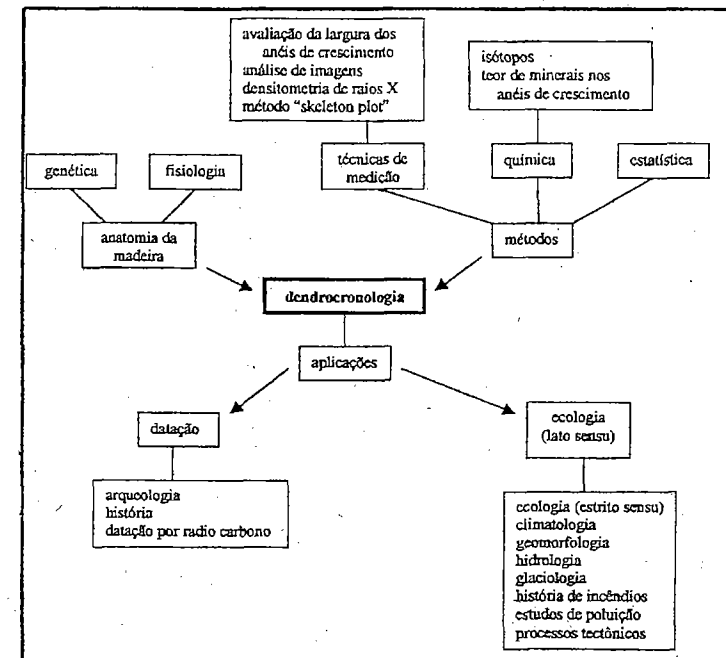


Figura 9 – A dendrocronologia: conexão com outras disciplinas, métodos de análise dos anéis de crescimento e suas aplicações (Kaennel e Schweingruber, 1995)

Metodologias aplicadas em dendrocronologia

As investigações iniciais em dendrocronologia aplicavam os métodos do *skeleton plot* e de delimitação, contagem e mensuração dos anéis de crescimento através de análises macroscópicas e uso de mesa de mensuração. Os trabalhos atuais incorporam metodologias inovadoras, como a da densitometria de raios X, os sistemas de análise de imagens e os avançados programas de informática para o tratamento e a interpretação das informações detectadas a partir dos anéis de crescimento.

Os métodos de avaliação de parâmetros de anéis de crescimento de discos de madeira tiveram uma significativa evolução com os avanços da informática. Atualmente, o exame da seção transversal das amostras de madeira previamente polida para destacar os anéis de crescimento, sob microscópio estereoscópico, possibilita a mensuração, da largura dos anéis de crescimento em mesa de medição e computador, com uma precisão de 0,01 mm. A técnica da microdensitometria de raios X, desenvolvida na França por Polge (1978), permite a determinação da densidade da madeira intra e interanéis de crescimento, através da leitura de um filme radiográfico de amostras finas de madeira em um microdensitômetro. Por sua vasta aplicação, foi difundida na Europa e na América do Norte e, posteriormente, em outros países, incluindo o Brasil (Amaral e Tomazello F^o, 1998) (Figuras 10, 11).

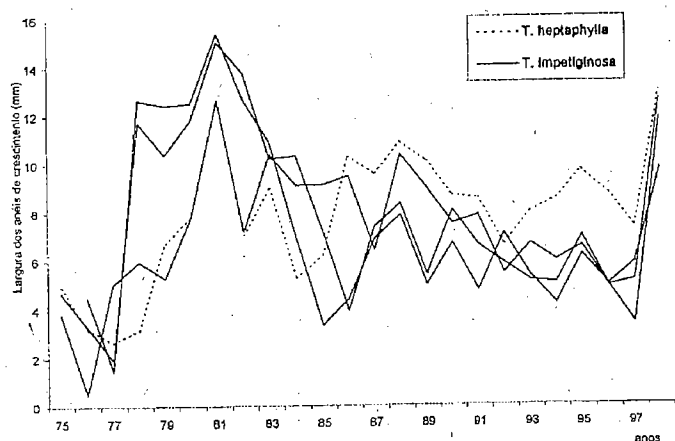


Figura 10 – Largura média dos anéis de crescimento anuais de árvores de *Tabebuia heptaphylla* e *T. impetiginosa* (Lisi, Pessenda e Tomazello F^o, 1998)

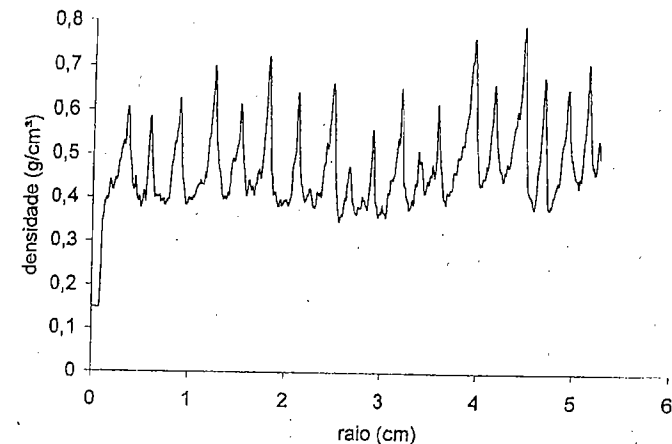


Figura 11 – Anéis de crescimento em árvore de *Araucaria angustifolia*: variação radial da densidade inter e intra-anéis de crescimento, por densitometria de raios X (Lisi, Lemos e Tomazello F^o, 1999)

Os princípios da dendrocronologia

A dendrocronologia é fundamentada em uma série de princípios, considerados como “leis da ciência”. Esses princípios foram enunciados a partir de 1785 (princípio da uniformidade), sendo mais recente o de 1987 (princípio do crescimento agregado das árvores). Alguns princípios, como o da repetição, são comuns a outras ciências, sendo que as pesquisas com dendrocronologia devem, necessariamente, atender a todos os princípios.

Princípio da uniformidade

Estabelece que “os processos físicos e biológicos relacionados com as condições ambientais atuais e com as variações do crescimento das árvores no presente atuaram, da mesma forma, no passado”. Indica que o “presente é a chave do passado” (Hutton apud Fritts, 1976), com a dendrocronologia complementando que “o passado é a chave do futuro”, ou seja, determinando-se as condições

ambientais que atuaram no passado pelos anéis de crescimento pode-se inferir sobre o futuro. O princípio da uniformidade é o fundamento básico para a aplicação da dendrocronologia para analisar as condições do passado, por exemplo, na reconstrução do clima de uma região abrangendo períodos anteriores aos dos registros de estações meteorológicas através dos anéis de crescimento das árvores (Figura 12).

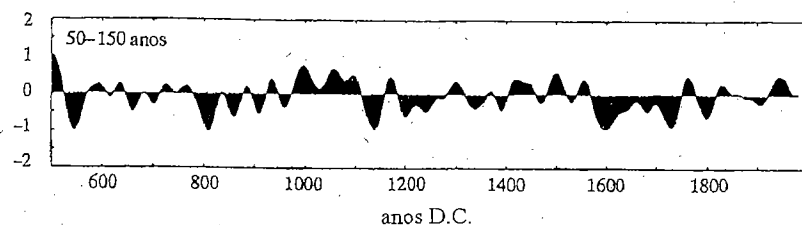


Figura 12 – Curva da temperatura de verão (julho-agosto) reconstruída a partir da análise da largura dos anéis de crescimento de árvores (Briffa et alii, 1990)

Princípio do fator limitante

Estabelece que “o crescimento de uma árvore é sempre controlado por determinados fatores externos (água, temperatura, luz, CO_2 , O_2 , minerais, etc.) e internos (enzimas, fatores de crescimento, etc.)”. Dessa forma, o ritmo dos processos biológicos, como o crescimento em altura e diâmetro das árvores, é controlado pela disponibilidade desses fatores. Por exemplo, se a precipitação é o principal fator limitante para o crescimento em diâmetro do tronco de uma árvore, a atividade cambial anual será reflexo da quantidade total de chuvas desse ano considerado (Figura 13).

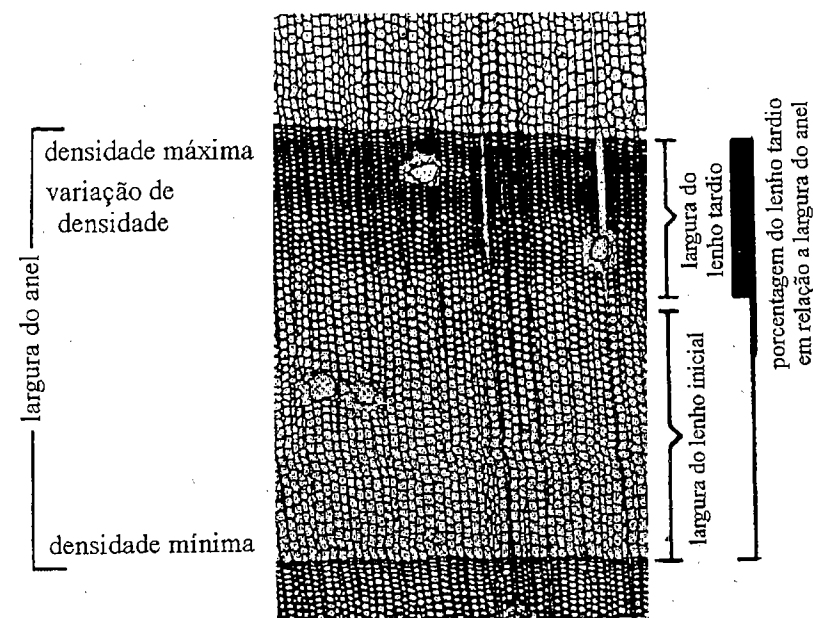


Figura 13 – Características das células (traqueídes) e da densidade do anel de crescimento de conífera. O lenho inicial é largo e de menor densidade, formado pelo câmbio quando não há limitação dos fatores de crescimento. O lenho tardio é estreito e de maior densidade, formado quando existe restrição dos fatores de crescimento (Schweingruber, 1987)

Princípio da datação cruzada (interdatação)

Estabelece que “a comparação da largura ou outro parâmetro dos anéis de crescimento (como a densidade) de várias séries cronológicas (amostras) possibilita a determinação do ano exato da formação do anel de crescimento”. Por exemplo, pela interdatação e pela comparação dos anéis de crescimento de amostras de madeira de construções, de árvores mortas e vivas, pode-se calcular a data exata da construção de casas de povoados indígenas, embarcações, etc. (Figura 14).

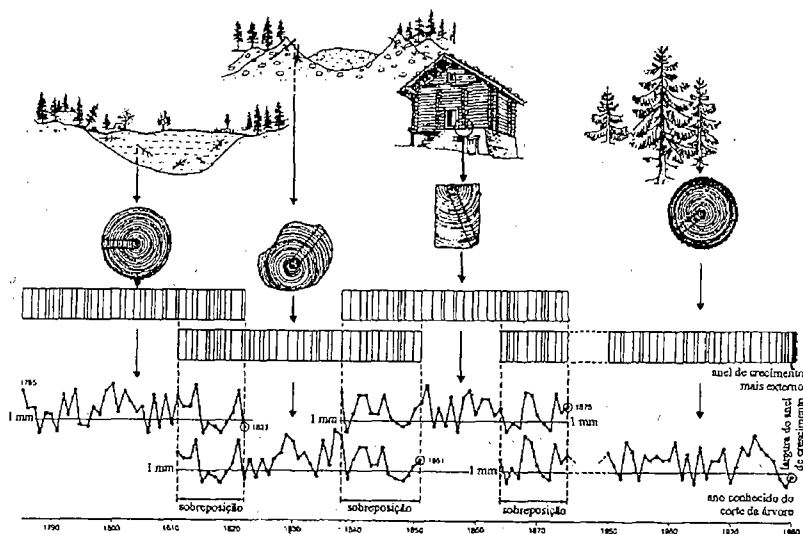


Figura 14 – Amostras de madeira de coníferas indicando os anéis de crescimento com características semelhantes, possibilitando a datação cruzada e a determinação do ano de formação dos anéis de crescimento (Schweingruber, 1987)

Princípio da repetição

Estabelece que “um sinal ou fator ambiental analisado pode ser maximizado e a quantidade de ruído minimizada, pela amostragem de mais de um raio por árvore e mais de uma árvore por sítio”. A retirada de mais de uma amostra por tronco reduz a quantidade da variabilidade dentro da árvore, ou seja, diminui-se o valor de um sinal ambiental não desejável característico presente em uma única árvore. Pela amostragem de várias árvores de um sítio ou de vários sítios em uma dada região assegura-se que a quantidade de ruído (um fator ambiental que não está sendo estudado, como a poluição) seja minimizado.

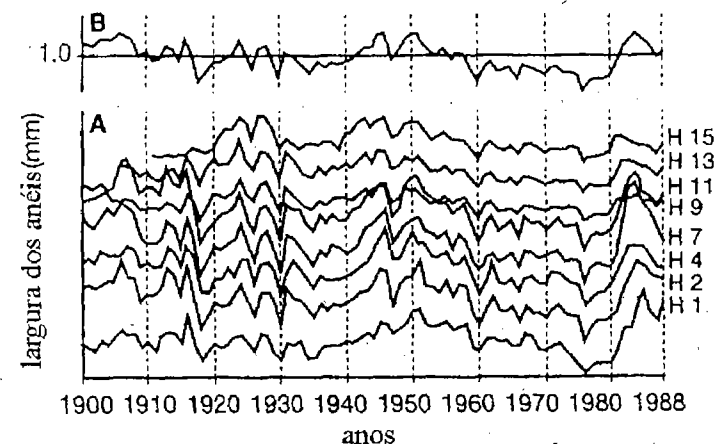


Figura 15 – Séries cronológicas (curvas de crescimento) de diferentes árvores de *Fagus sylvatica* a partir de amostras de madeira, obtidas de 1-15 m de altura do tronco, indicando que as árvores estão respondendo a um sinal climático regular (Kaennel e Schweingruber, 1995)

Princípio da amplitude ecológica

Estabelece que “as árvores de uma mesma espécie são mais sensíveis aos fatores ambientais em condições de latitude e altitude nos limites de sua área de ocorrência natural”. Esse princípio é importante, a exemplo dos demais, sendo que as árvores adequadas para os estudos dendrocronológicos são, geralmente, as encontradas às margens da sua área de ocorrência natural (Figura 16).

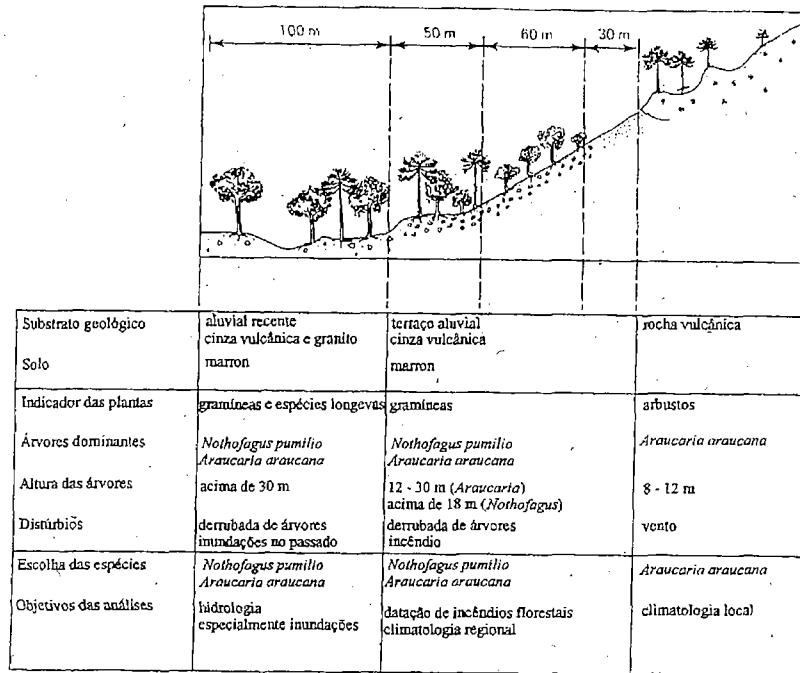


Figura 16 – Características da área de ocorrência natural de árvores de *Araucaria araucana* e de *Nothofagus pumilio* no sul da Cordilheira dos Andes, a 1.700 m de altitude, para estudos dendrocronológicos (Schweingruber, 1987).

Princípio da seleção do sítio

Estabelece que “a seleção de um sítio para pesquisas em dendrocronologia deve ser conduzida com critérios de forma que as árvores mostrem reação de sensibilidade à variável ambiental a ser estudada” ou “os sítios selecionados devem maximizar o sinal climático que está sendo analisado pelos anéis de crescimento das árvores”. Por exemplo, as árvores que respondem especificamente às condições de seca são usualmente encontradas em locais onde as chuvas são limitantes, como nos terrenos com exposição de rochas e encosta de montanhas. Dessa forma, para a determinação da frequência de secas pelos anéis de crescimento, as árvores selecionadas devem ser procedentes de uma região com limitada disponibilidade de água. Deve ser considerado que, em baixas elevações ou em

sítios mésicos (úmidos), as árvores da espécie em estudo podem produzir séries de anéis de crescimento não sensíveis ao déficit hídrico. De acordo com as condições de sítio, a reação das árvores pode ser definida como sensível ou complacente (Figura 17).

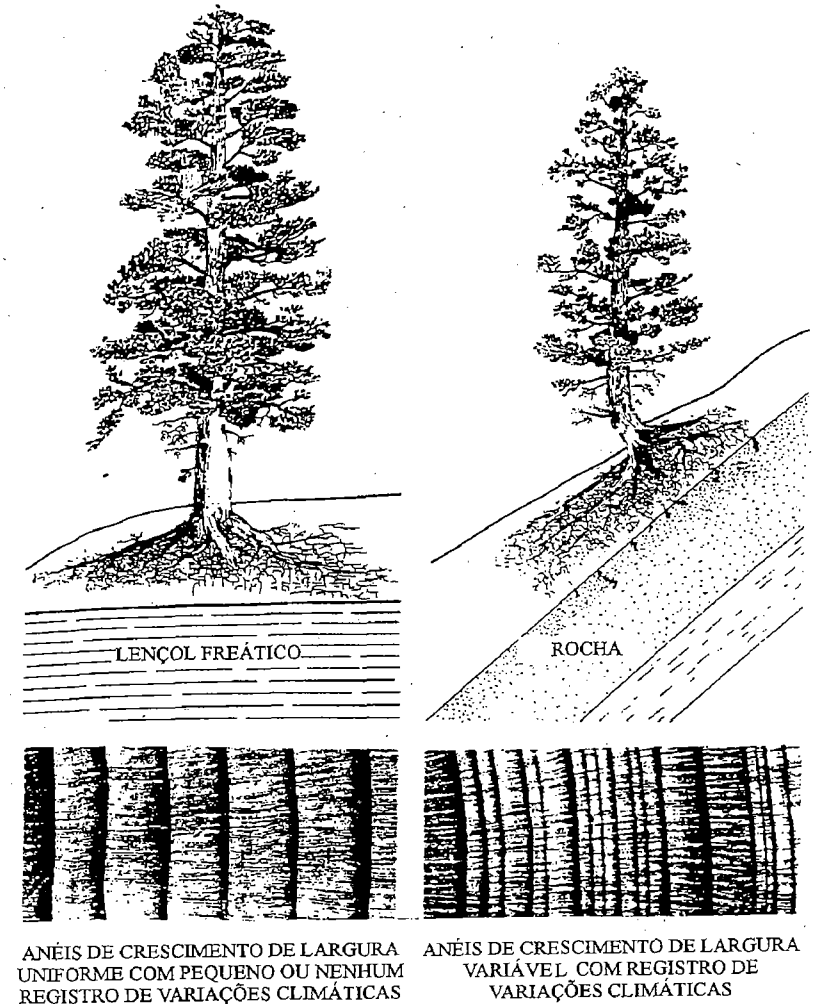


Figura 17 – Seleção do sítio para estudos dendrocronológicos: condições da topografia e do lençol freático e seus reflexos na parte aérea, no sistema radicular e nos anéis de crescimento das árvores, evidenciando a reação de sensibilidade e complacência (Fritts, 1976)

Princípio do crescimento agregado

Estabelece que “o crescimento de uma árvore, em um dado ano, pode ser decomposto por fatores do ambiente (antropogênicos ou naturais) que afetam o padrão de crescimento dessa árvore através do tempo”. Por exemplo, as características do anel de crescimento de um dado ano é função de variáveis como (1) a *idade* (relacionada com a tendência do crescimento em função do envelhecimento da árvore), (2) as *condições climáticas anuais*, (3) os *fatores do interior* do povoamento florestal (queda de árvores, competição, etc.), (4) os *fatores do exterior* (epidemia de insetos causando desfolha e redução do crescimento das árvores, incêndios, etc.), (5) os processos não explicados pelos fatores ou o *erro*.

Portanto, para maximizar o sinal ambiental a ser estudado deve-se minimizar os demais fatores: para maximizar o *sinal climático*, deve-se (1) remover o efeito da idade das árvores e (2) selecionar as árvores e o sítio, minimizando o efeito dos fatores internos e externos que afetam o crescimento das árvores.

O modelo de crescimento das árvores pode ser expresso por uma fórmula matemática, através da seguinte equação:

$$R_t = I_t + C_t + D1_t + D2_t + E_t$$

sendo que: o crescimento de um anel de crescimento (R) de uma árvore, em um ano (t) é função de uma série de variáveis relacionadas com a idade (I), clima (C), distúrbios internos (D1) e externos (D2) na população, e o erro (E) ou a variabilidade não explicada e não relacionada com os demais sinais.

Espécies potenciais para dendrocronologia no Brasil

Inúmeras espécies florestais coníferas de folhosas de clima temperado são tradicionalmente utilizadas e potencialmente importantes para estudos dendrocronológicos pela sazonalidade da atividade cambial, pelo comportamento fenológico distinto e pelos anéis de crescimento anuais perfeitamente demarcados no lenho das árvores. No entanto, em climas tropicais e subtropicais, há necessidade de pesquisar a biologia da formação do lenho e a fenologia das árvores de espécies que formam anéis de crescimento e as relações com as variáveis climáticas. Dentre elas destacam-se algumas espécies com

informações dendrocronológicas, como as das famílias Bombacaceae (*Scleronema micranthum*), Sapotaceae (*Manilkara bidentata*), Myristicaceae (*Viola michelii*, *V. melionii*), Euphorbiaceae (*Piranhea trifoliata*, *Mabea nitida*), Simaroubaceae (*Simarouba amara*), Meliaceae (*Cedrela* spp, *Swietenia macrophylla* e *Toona ciliata*), Verbenaceae (*Tectona grandis*), Bignoniaceae (*Tabebuia* spp, *T. barbata*, *Zeyheria tuberculosa*, *Jacaranda copaia*), Araucariaceae (*Araucaria angustifolia*), Anacardiaceae (*Astronium graveolens*), Lecythidaceae (*Cariniana* spp, *Lecythis* spp), Leguminosae Caesalpinoideae (*Copaifera langsdorffii*, *Hymenaea courbaril*, *Eperua* sp, *Macarobium acaciaefolium*), Leguminosae Mimosoideae (*Anadenanthera macrocarpa*), Leguminosae Papilionoideae (*Centrolobium tomentosum*, *Dipteryx alata*), Rutaceae (*Esenbeckia leiocarpa*), dentre outras (Détienne, 1989, 1995; Seitz e Kanninen, 1989; Botosso e Vetter, 1991; Vetter e Botosso, 1989; Worbes, 1989, 1995; Luchi, 1998; Mattos, 1999; Mattos, Seitz e Muniz, 1999; Tomazello F^o, 1989; Marcati e Angyalossi-Alfonso, 1999; Callado, Scarano e Costa, 1999; Tomazello F^o e Cardoso, 1999).

Conclusões

Inúmeras árvores de espécies florestais de coníferas e de folhosas de clima temperado e tropical apresentam anéis de crescimento anuais como resultado da sazonalidade da atividade cambial e das condições climáticas. Pela dendrocronologia, é possível determinar a idade e a taxa de crescimento das árvores e o efeito das variações ecológicas, sejam naturais ou antropogênicas. Trata-se de uma excepcional ferramenta a ser utilizada como indicador ambiental em ecossistemas tropicais. Enquanto nas florestas de clima temperado os anéis de crescimento têm sido utilizados como indicadores ambientais, em condições tropicais as pesquisas iniciaram-se há poucas décadas. As metodologias mais avançadas de análise dos anéis de crescimento, como a densitometria de raios X e a análise de imagens, estão disponíveis em laboratórios do país, possibilitando a aplicação em um grande número de espécies florestais. No entanto, a dendrocronologia deve, como ciência, atender a uma série de princípios fundamentais e se relacionar com outras ciências correlatas para a ampliação das espécies potenciais e possibilitar a aplicação dos anéis de crescimento como indicadores ambientais.

Referências bibliográficas

- ALVIM, P. T. (1964). "Tree growth periodicity in tropical climates". In: ZIMMERMANN, M. H. *The formation of wood in forest trees*. New York, Academic Press.
- ALVIM, P. T. e ALVIM, R. (1976). "Relation of climate to growth periodicity in tropical trees". In: TOMLINSON, P. B. e ZIMMERMANN, M. H. *Tropical trees as living systems*. Cambridge, Cambridge University Press.
- AMARAL, A. C. B. e TOMAZELLO F^o, M. (1998). Avaliação das características dos anéis de crescimento de *Pinus taeda* pela técnica de microdensitometria de raios X. *Revista Ciência e Tecnologia*, v. 6, n. 11-12, pp. 17-23.
- AMOBI, C. C. (1973). Periodicity of wood formation in some trees of lowland rainforest in Nigeria. *Annals of Botany*, v. 37, pp. 211-18.
- BAAS, P. e VETTER, R. E. (1989). Growth rings in tropical trees. *IAWA Bulletin*, v. 10, n. 2, pp. 95-184.
- BORMAN, F. H. e BERLYN, G. (1981). *Age and growth rate of tropical trees: new directions for research*. New Haven, Yale University Press.
- BOTOSSO, P. C. e VETTER, R. E. (1991). Alguns aspectos da periodicidade e taxa de crescimento em 8 espécies arbóreas tropicais de Floresta de Terra Firme (Amazônia). *Revista do Instituto Florestal*, v. 3, n. 2, pp. 163-80.
- BRIFFA, K. R.; BARTHOLIN, T. S.; ECKSTEIN, D.; JONES, P. D.; KARLEN, W.; SCHWEINGRUBER, F. H. e ZETTERBERG, P. A. (1990). 1,400-year tree-ring record of summer temperature in Fennoscandia. *Nature*, n. 6283, pp. 434-439.
- CALLADO, C. H.; SCARANO e COSTA, C. G. (1999). Ocorrência de anéis de crescimento em 13 espécies da Floresta Atlântica de baixada do Estado do Rio de Janeiro. CONGRESSO NACIONAL DE BOTÂNICA, 50. Blumenau, 1999. *Anais*. São Paulo, Sociedade Botânica do Brasil.
- CHOWDHURY, K. A. (1939). The formation of growth rings in Indian trees. I. *Indian Forest Records*, v. 2, pp. 1-39.

- CORONA, E. (1986). *Dendrochronologia: principi e applicazioni*. Verona, Instituto Italiano di Dendrochronologia.
- CURREY, D. R. (1965). An ancient bristlecone-pine stand in Eastern Nevada. *Ecology*, v. 46, n. 4, pp. 564-566.
- DENNE, M. P. e DODDS, R. S. (1981). "The environmental control of xylem differentiation". In: BARNETT, J. R. *Xylem cell development*. Londres, Castle House Publications.
- DÉTIENNE, P. (1989). Appearance and periodicity of growth rings in some tropical trees. *IAWA Bulletin*, v. 10, n. 2, pp. 123-132.
- _____. (1995). Nature et périodicité des cernes dans quelques bois guyanais. *Bois et forêts des tropiques*, n. 243, pp. 65-75.
- DUFF, G. H. e NOLAN, N. J. (1957). Growth and morphogenesis in the Canadian forest species. II. Specific increments and their relation to the quantity and activity of growth in *Pinus resinosa*. *Canadian Journal of Botany*, v. 471, pp. 471-513.
- ECKSTEIN, D.; SASS, U. e BAAS, P. (1995). Growth periodicity in tropical trees. *IAWA Journal*, v. 16, n. 4, pp. 323-442.
- FRITTS, H. C. (1976). *Tree rings and climate*. New York, Academic Press.
- FRITTS, H. C. e SHASHKIN, A. V. (1995). "Modelling tree-ring structure as related to the temperature, precipitation and day length". In: LEWIS, T. E. *Tree-rings as indicators of ecosystem health*. Londres, CRC Press.
- HARLOW, W. M. e HARRAR, E. S. (1969). *Textbook of dendrology*. New York, McGraw-Hill.
- KAENNEL, M. e SCHWEINGRUBER, F. H. (1995). *Multilingual glossary of dendrochronology*. Berna, Paul Haupt Publishers.
- LISI, C. S.; PESSENDA, L. C. R. e TOMAZELLO FILHO, M. (1998). Aplicação da análise da espessura dos anéis de crescimento de árvores de *Araucaria angustifolia*, em estudos dendrocronológicos. CONGRESSO BRASILEIRO DE BOTÂNICA, 49. Salvador, 1998. *Anais*. São Paulo, Sociedade Botânica do Brasil.
- LISI, C. S.; PESSENDA, L. C. R. e TOMAZELLO FILHO, M. (1998). Dendrochronological application of tree-ring widths of

- Tabebuia* spp, Bignoniaceae, trees in Brazil. CONGRESSO LATINOAMERICANO DE BOTÂNICA, 49. Cidade do México, 1998. *Anais*. México, Sociedade Latinoamericana de Botânica.
- LISI, C. S.; LEMOS, A. V. e TOMAZELLO FILHO, M. (1999). Variação radial da estrutura anatômica da madeira de *Tabebuia heptaphylla* e *T. impetiginosa*. CONGRESSO NACIONAL DE BOTÂNICA, 50. Santa Catarina, 1999. *Anais*. São Paulo, Sociedade Botânica do Brasil.
- LUCHI, E. L. (1998). *Periodicidade de crescimento em Hymenaea courbaril L. e anatomia ecológica do lenho de espécies de mata ciliar*. Tese de doutorado. São Paulo, USP.
- MARCATI, C. R. e ANGYALOSSY-ALFONSO, V. (1999). Alguns aspectos sobre a sazonalidade cambial em espécies arbóreas tropicais. CONGRESSO NACIONAL DE BOTÂNICA, 50. Santa Catarina, 1999. *Anais*. São Paulo, Sociedade Botânica do Brasil.
- MATTOS, P. P. (1999). *Identificação de anéis anuais de crescimento e estimativa de idade e incremento anual em diâmetro de espécies nativas do pantanal da Nhecolândia-MS*. Tese de doutorado. Curitiba, Universidade Federal do Paraná.
- MATTOS, P. P.; SEITZ, R. A. e MUNIZ, G. I. B. (1999). "Identification of annual growth rings based on periodical shoot growth". WIMMER, R. e VETTER, R. E. *Tree-ring analysis: biological, methodological and environmental aspects*. Londres, Cabi Publishing.
- POLGE, H. (1978). Fifteen years of wood radiation densitometry. *Wood Science and Technology*, v. 12, pp. 187-196.
- SCHWEINGRUBER, F. H. (1987). *Tree rings - basics and applications of dendrochronology*. Berna, Kluwer Academic Publishers.
- ____ (1996). *Tree rings and environment. Dendroecology*. Berna, Paul Haupt Publishers.
- SEITZ, R. A. e KANNINEN, M. (1989). Tree ring analysis of *Araucaria angustifolia* in southern Brazil: preliminary results. *IAWA Bulletin*, v. 10, n. 2, pp. 170-174.

- TOMAZELLO F^o, M. (1995). Dendrochronology in Brazil: current situation and perspectives. *IAWA Journal*, v. 16, n. 1, p. 31.
- ____ (1998). *Araucaria angustifolia*, the Brazilian pine, for dendrochronological studies. In: SOUTHEAST ASIAN DENDRO WORKSHOP, 98. Chiang Mai, 1998. *Anais*. Thailand, Lamont - Doherty Geological Observatory, p. 14.
- TOMAZELLO F^o, M. e WORBES, M. (1998). Potentiality and applications of dendrochronology in tropical species. CONGRESSO LATINOAMERICANO DE BOTÂNICA, 49. Cidade do México, 1998. *Anais*. México, Sociedade Latinoamericana de Botânica.
- TOMAZELLO F^o, M. e CARDOSO, N. S. (1999). "Seasonal variations of the vascular cambium of teak (*Tectona grandis* L.) in Brazil". In: WIMMER, R. e VETTER, R. E. *Tree-ring analysis: biological, methodological and environmental aspects*. Londres, Cabi Publishing.
- VETTER, R. E. e BOTOSSO, P. C. (1989). Remarks on age and growth rate determination of Amazonian trees. *IAWA Bulletin*, v. 10, n. 2, pp. 133-145.
- WIMMER, R. (1994). "Structural, chemical and mechanical trends within coniferous trees". In: SPICKER, H. e KAHLE, P. *Modelling tree-ring development cell structure and environment. Proceeding*. Freiburg. Alemanha, University of Freiburg.
- WIMMER, R. e VETTER, R. E. (1999). *Tree-ring analysis - biological, methodological and environmental aspects*. Londres, Cabi Publishing.
- WORBES, M. (1989). Growth rings, increment and age of trees in inundation forests, savannas and mountain forest in Neotropics. *IAWA Bulletin*, v. 10, n. 2, pp. 109-122.
- ____ (1995). How to measure growth dynamics in tropical trees - a review. *IAWA Journal*, v. 16, n. 4, pp. 337-351.

Paulo Cesar Botosso
Mário Tomazello Filho

Aplicação de faixas dendrométricas na dendrocronologia: avaliação da taxa e do ritmo de crescimento do tronco de árvores tropicais e subtropicais

A avaliação contínua dos incrementos em circunferência do tronco das espécies arbóreas possibilita, a médio e longo prazos, a determinação do ritmo e da taxa de crescimento, da periodicidade da atividade cambial e da influência dos fatores climáticos. Dentre os equipamentos disponíveis para o acompanhamento do crescimento do tronco das árvores destacam-se as faixas dendrométricas, pela precisão e execução da leitura, facilidade de montagem, instalação e manutenção em condições de campo, além do baixo custo. O seu emprego, em associação com as marcações anuais do câmbio das árvores, fornece informações sobre a atividade cambial, a determinação da época e o tipo de lenho formado e a sua sazonalidade em relação com as condições climáticas, fundamentais para inúmeras áreas das ciências florestais e do ambiente denominadas dendrocronologia e dendroecologia (Fritts, 1976; Fahn et alii, 1981; Kaennel e Schweingruber, 1995; Schweingruber, 1996).

Fundamentação teórica

Nos ecossistemas tropicais com clima mais uniforme, em comparação às regiões temperadas, assumia-se que a atividade cambial das árvores mantinha-se praticamente constante durante todo o ano, considerando-se impraticável a análise dos anéis de crescimento pela ausência de estação indutora de dormência ou de redução dos pro-

cessos fisiológicos. Todavia, as pesquisas têm demonstrado que muitas espécies de árvores tropicais apresentam crescimento intermitente (Koriba, 1958; Njoku, 1963; Mariaux, 1970, 1979, 1981; Catinot, 1970; Amobi, 1973; Détienne e Mariaux, 1977; Détienne, 1976; Prévost e Puig, 1981; Détienne et alii, 1988; Vetter e Botosso, 1989a; Worbes, 1989; Détienne, 1989; Cardoso, 1991; Killmann e Thong, 1995; Worbes, 1995; Gourlay, 1995; Tomazello Filho e Cardoso, 1999). Para Fahn et alii (1981), a periodicidade da atividade do câmbio parece ser decorrente de alterações na temperatura, comprimento do dia e precipitação pluviométrica, com os fatores endógenos inerentes a cada espécie controlando o seu ritmo de crescimento. Dessa forma, a periodicidade da atividade cambial, em resposta aos eventos fenológicos e ao clima, resulta em alterações na estrutura e dimensões dos elementos anatômicos do xilema, caracterizados pelos anéis de crescimento. A necessidade da determinação da taxa de crescimento e da idade em árvores de espécies tropicais propiciou o desenvolvimento de métodos de análise denominados estático e dinâmico.

O *método estático* possibilita determinar a periodicidade da atividade cambial e o crescimento de árvores de idade conhecida, analisando a formação de anéis de crescimento anuais de amostras de madeira extraídas do seu tronco. Compreende o exame micro e macroscópico do lenho e a aplicação de técnicas como raios laser, densitometria de raios X, radiação gama, análise de imagens, etc.

O *método dinâmico* consiste na implantação de faixas dendrométricas permanentes no tronco das árvores (Hall, 1944; Liming, 1957; Mariaux, 1977; Vetter, 1995; Kuroda e Kiyono, 1997) e na pequena incisão na casca (Détienne, 1989; Botosso e Vetter, 1991) ou inserção de agulha ou prego fino atingindo a área cambial e ocasionando uma pequena cicatriz no xilema (Wolter, 1968; Shiokura, 1989; Nobuchi et alii, 1995).

Nas florestas tropicais do continente africano, vários trabalhos de pesquisa aplicaram a técnica dinâmica em diferentes espécies florestais, possibilitando determinar a idade e a taxa de crescimento das árvores pela observação da periodicidade da atividade cambial e formação das camadas de crescimento. Verificou-se que o crescimento em diâmetro das árvores analisadas depende diretamente da disponibilidade de água no período de chuvas, ocorrendo uma redução da atividade cambial na estação seca, com a formação, no lenho, de

camadas de crescimento anatomicamente definidas (Mariaux, 1967a, 1969, 1970; Catinot, 1970; Détienne e Mariaux, 1975, 1976, 1977; Akachuku, 1984; Détienne, 1989).

Na América do Sul, a técnica dinâmica foi utilizada nos estudos realizados na Guiana Francesa (Prévost e Puig, 1981; Détienne, 1989; Détienne et alii, 1988; Gazel, 1983), Suriname (Schulz, 1960), Argentina (Boninsègna et alii, 1989) e na Amazônia Central (Worbes, 1985, 1986, 1989, 1995; Worbes e Junk, 1989; Vetter e Botosso, 1988, 1989a, 1989b; Botosso e Vetter, 1991; Botosso et alii, 2000).

Faixas dendrométricas

Tipos, características e montagem

Os dendrômetros permitem a medição contínua do crescimento diametral ou da circunferência do tronco das árvores e, desta forma, determinam os períodos de atividade cambial e sua relação com ritmo de crescimento e variáveis climáticas (Kätsch et alii, 1992).

Existem dois tipos básicos de dendrômetros, (1) os que medem os incrementos em circunferência do tronco das árvores, com fitas metálicas graduadas, denominadas faixas ou bandas dendrométricas, de acordo com os modelos propostos por diversos pesquisadores (Hall, 1944; Liming, 1957; Mesavage e Smith, 1960; Bormann e Kozlowski, 1962; Mariaux, 1977) e (2) os que medem os incrementos do raio, de um período considerado, pela distância entre o ponto de apoio fixado no lenho e a superfície da casca do tronco das árvores, denominados dendrômetro com indicador de calibração ou de medida (Daubenmire, 1945; Brown et alii, 1947; Tryon e Finn, 1949; Kuroiwa, 1957; Bormann e Kozlowski, 1962), dendrômetro com paquímetro micrométrico (Byram e Doolittle, 1950) e dendrômetro registrador (MacDougal, 1921; Fritts e Fritts, 1955). Atualmente, estão disponíveis novos dendrômetros, desenvolvidos a partir dos primeiros modelos, que avaliam demais parâmetros fisiológicos, acoplados a outros equipamentos, e que incorporam os recentes recursos da informática e da automatização. Esses modelos caracterizam-se por precisão, grande sofisticação e elevado custo (Takahashi e Tabuchi, 1990; Pesonen et alii, 1995; Gast, 1996; Andrae e Preuhsler, 1995; Tabuchi e Takahashi, 1998;

Downes et alii, 1999), sendo alguns disponíveis, como o Manual Band Dendrometer-series 5, produzido nos Estados Unidos, e os dendrômetros eletrônicos Dial Dendro UMS-D4 e o Strain-Gauge D6, produzidos na Alemanha.

As faixas dendrométricas permanentes, modificadas a partir do modelo de fita metálica, têm sido empregadas por diferentes pesquisadores. Na África e na Guiana Francesa, Mariaux (1969, 1970), Détienne (1976), Détienne e Mariaux (1977), Détienne et alii, (1988), Détienne (1989) utilizaram faixas dendrométricas de aço para estudar o ritmo, a taxa de crescimento e a periodicidade dos anéis de crescimento de árvores tropicais; na França, Marien e Thibout (1980) avaliaram o ritmo de crescimento de *Eucalyptus* spp. com faixas dendrométricas de alumínio e leitura com paquímetro; na Guiana Francesa, Prévost e Puig (1981) determinaram o crescimento, em diâmetro, de árvores de florestas primária e secundária com dendrômetros de aço; na Malásia, Komiyama et alii (1987) analisaram o crescimento em diâmetro de 25 espécies folhosas decíduas com dendrômetros de aço, Jalil et alii (1998) determinaram a periodicidade de crescimento de *Hevea brasiliensis* com dendrômetros de alumínio e Nordanstig (1998) mensurou o diâmetro de árvores de *Acacia mangium* com dendrômetros de aço; na Amazônia brasileira, Vetter e Botosso (1988, 1989a), Botosso e Vetter (1991), Vetter (1995) e Botosso et alii (2000) determinaram a periodicidade e a taxa de crescimento do tronco de árvores tropicais com dendrômetros de fitas de aço.

Esses dendrômetros são confeccionados com fitas de aço inoxidável de 12,7 x 0,15 mm (largura e espessura), dotados de escala graduada em mm e nônio e com a precisão na leitura de 0,2 mm, sendo mantidos sob tração por uma mola de aço inoxidável de 100 x 8 mm (comprimento e diâmetro) ao redor do tronco das árvores, na altura do seu DAP (1,30m) (Figura 1).

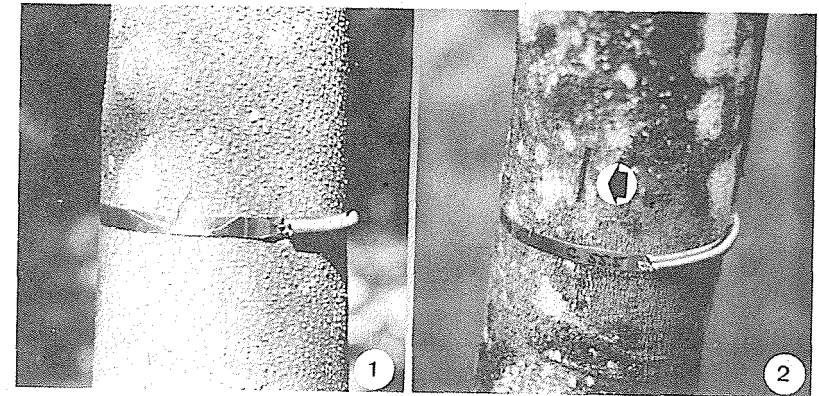


Figura 1 – Faixas dendrométricas de fita de aço utilizadas na medição contínua do incremento em circunferência do tronco das árvores. **1.** Dendrômetro mostrando a escala graduada e nônio sobrepostos. **2.** Dendrômetro e marcação cambial anual (seta)

Para a montagem das faixas dendrométricas determina-se (1) a circunferência do tronco da árvore (C) em mm na altura do DAP, (2) corta-se a fita de aço adicionando, no mínimo, um segmento de 170 mm ao valor da circunferência (C) necessário para as extremidades e sobreposição da escala com o nônio recobrando a escala graduada, (3) demarcam-se as graduações da escala e nônio na fita de aço com gabarito composto de 2 placas de metal de 13 x 8 cm, tendo a borda de uma das placas 41 fendas espaçadas de 2 mm, formando uma graduação de 80 mm (borda inferior da placa – escala de leitura) e outra com 11 fendas espaçadas de 1,8 mm formando as 10 divisões do nônio (borda superior da placa), coincidindo com 9 divisões da escala principal de leitura (ou seja, 18 mm) (Figura 2).

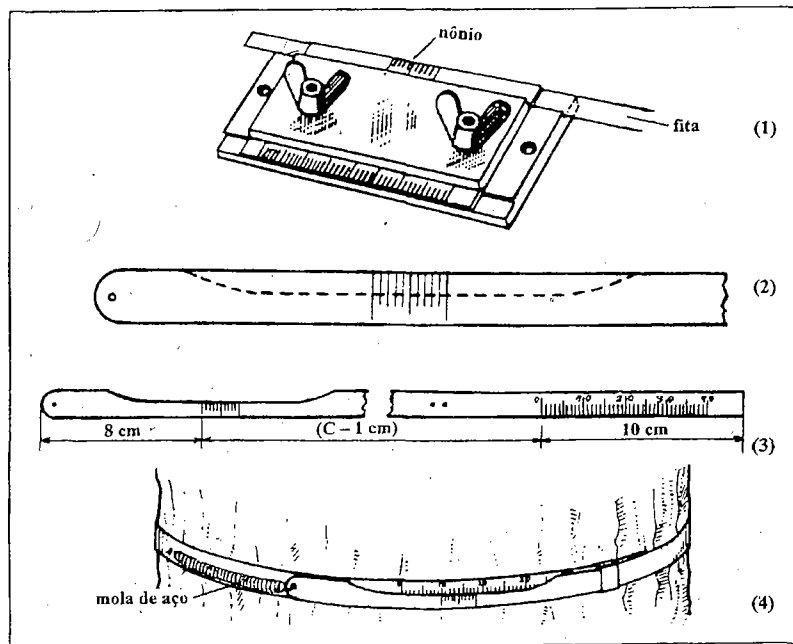


Figura 2 – Etapas da montagem e instalação da faixa dendrométrica no tronco de uma árvore. **1.** Posição da fita de aço no gabarito para gravação da escala e nônio. **2.** Corte da fita na linha tracejada sobre o nônio. **3.** Aspecto geral da faixa dendrométrica. **4.** Instalação da faixa dendrométrica no tronco (Mariaux, 1977)

Exemplos de aplicação

Floresta de Terra Firme na Amazônia – AM

Com o objetivo de estudar o crescimento em circunferência do tronco de árvores de cedro (*Cedrela odorata*) Meliaceae, jacareúba (*Calophyllum angulare*) Clusiaceae e muirapiranga (*Eperua bijuga*) Leg. Caesalpinoideae, da floresta de Terra firme da Amazônia, Manaus, para aplicação em dendrocronologia, foram instaladas faixas dendrométricas de aço, realizando-se leituras mensais por 18 meses.

As variações das taxas de crescimento em circunferência do tronco das árvores das três espécies florestais estão estreitamente relacionadas à precipitação pluviométrica e à disponibilidade de água no solo na estação chuvosa e à ocorrência de um período de seca, com redução e/ou cessação da atividade cambial (Figura 3). Na fase de menor precipitação, a maioria das árvores reduziu e até paralisou o crescimento em circunferência dos seus troncos, principalmente as de cedro (*Cedrela odorata*), em resposta às alterações da atividade cambial (Figuras 3.1, 3.2), corroborando as observações de Botosso e Vetter (1991) para outras oito espécies arbóreas nessa área experimental. O crescimento é sensivelmente afetado na estação chuvosa (particularmente de novembro-janeiro), tornando-se mais reduzido quando se aproxima o término dessa estação (março-maio) e o início do período de seca (junho-agosto), com a retomada lenta e gradual do crescimento das árvores ainda no período de menor precipitação (Figura 4). As árvores de *C. odorata* (Figura 3.1, 3.2) e de *E. bijuga* (Figuras 3.3, 3.4) apresentam taxas de crescimento em circunferência do tronco diferenciadas em resposta às variações climáticas, conforme observado por Détienne et alii (1988) para espécies tropicais na Guiana Francesa. Dessa forma, a reduzida e inexistente taxa de incremento em diâmetro do tronco das árvores de *C. odorata*, na fase mais crítica da seca, demonstrou uma redução da atividade cambial pelo estresse causado pelo déficit de água no solo, conforme observado no Suriname (Schulz, 1960), na Guiana Francesa (Prévost e Puig, 1981; Détienne et alii, 1988 e Détienne, 1989) e na Amazônia Central (Vetter e Botosso, 1988, 1989a; Botosso e Vetter, 1991; Botosso et alii, 2000).

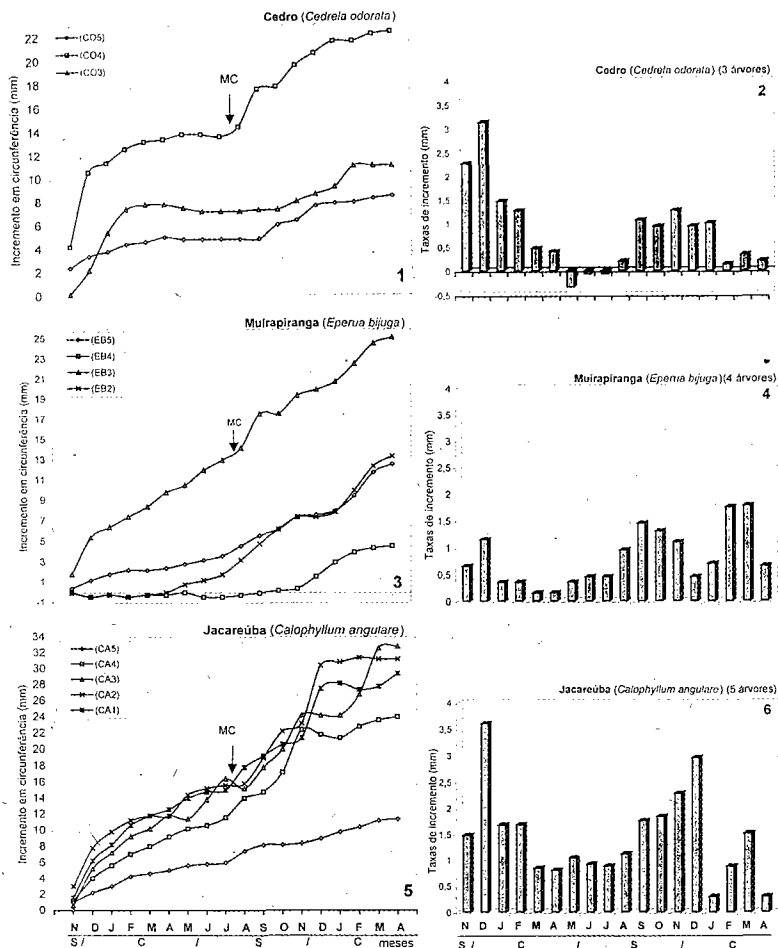


Figura 3 – Incremento em circunferência (IC) acumulado e taxa de incremento mensal médio do tronco das árvores. 1-2. Cedro (*C. odorata*). 3-4. Muirapiranga (*E. bijuga*). 5-6. Jacareúba (*C. angularare*)

Período de novembro/1988 – abril/1990.

S = período seco; C = período chuvoso; MC = marcação cambial.

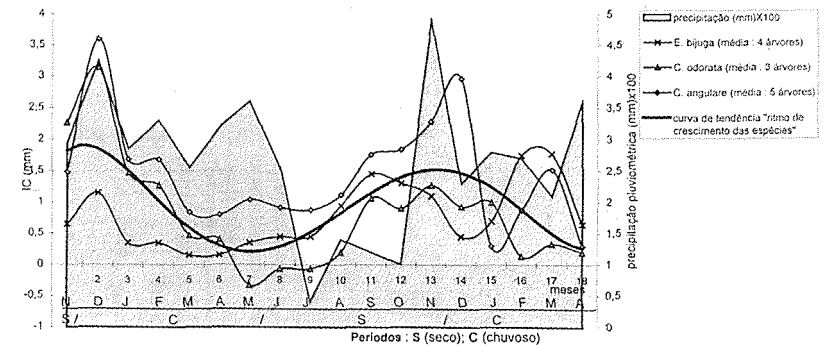


Figura 4 – Taxa de incremento mensal médio do tronco das árvores de cedro (*C. odorata*), muirapiranga (*E. bijuga*) e jacareúba (*C. angularare*) e de precipitação pluviométrica (mm x 100)

Período de novembro/1988 – abril/1990.

S = período seco; C = período chuvoso.

O reduzido valor de incremento em circunferência do tronco das árvores, do final da estação chuvosa até a seca, variou entre árvores e espécies, em função da redução ou da paralisação da atividade cambial por até 12 meses. Uma interrupção prolongada do crescimento em circunferência do tronco ocorreu em *C. odorata* (árvores CO3 e CO5; Fig. 3.1) e *E. bijuga* (árvore EB4; Fig. 3.3) quando atingiam 12 meses. Para *C. angularare* (árvore CA5), verificou-se baixa taxa de incremento, embora sem interrupção do crescimento do tronco (Figura 3.5), com as árvores apresentando as menores taxas de incremento (IC), em função do vigor e da capacidade de competição na floresta. Em florestas da África e da Guiana Francesa ocorre interrupção do crescimento em circunferência das árvores por 0,5 a 3 meses e por até 6 a 12 meses em árvores moderadamente vigorosas e fracas/suprimidas, respectivamente, demonstrando a relação da atividade cambial com a espécie, condições climáticas, vigor da árvore, incluindo sua idade e posição social no povoamento (Détienne, 1989). A taxa de crescimento em diâmetro das árvores depende das condições hidrológicas do solo (drenagem, profundidade, topografia, etc) e da floresta (táxon, diâmetro, arquitetura, constituição genética) com o nível de crescimento da árvore indicando sua

potencialidade genética e a condição de crescimento individual no povoamento (Détienne et alii, 1988; Worbes, 1989). Na Venezuela, árvores caducifólias de *C. odorata* mostram um longo período de dormência do câmbio na estação seca, enquanto as perenifólias, como *Cordia alliodora*, um ritmo de crescimento mais constante e curta interrupção da atividade cambial (Mariaux, 1969, 1970; Worbes, 1995). Na Amazônia, da mesma forma, árvores de *C. odorata* apresentam um longo período de dormência do câmbio de 2-7 meses, superior ao de outras espécies. Por outro lado, as árvores de *E. bijuga* (exceto a EB4) e de *C. angulare* mostraram taxa de crescimento do tronco praticamente contínua, inclusive na fase crítica de seca (julho-outubro), com somente 1-2 meses de paralisação da atividade cambial (Figuras 3.3 e 3.5) (Botosso e Vetter, 1991).

A diminuição das taxas de crescimento, ainda no período chuvoso, a partir do 2º e 3º meses finais do período (março-maio) antes do início da estação seca, parece associada à saturação de água no solo (Figuras 3.2, 3.4, 3.6, 4 e 5.1). Esse comportamento foi observado para outras espécies, quando a saturação de água no solo pode ocasionar a asfixia temporária e inibição do crescimento do sistema radicular (Détienne et alii, 1988; Bhattacharyya et alii, 1992). Após a redução dos incrementos em diâmetro do tronco das árvores, segue-se uma lenta e gradual retomada do crescimento no início e durante o período seco, imediatamente após as primeiras e baixas precipitações que antecedem a estação chuvosa (setembro-novembro) quando, segundo Prévost e Puig (1981) e Détienne et alii, (1988), os tecidos recém-formados recuperam sua turgidez e o câmbio retoma sua atividade, resultando nos máximos valores de crescimento do tronco (Figura 4). Os picos máximo e mínimo de incremento do tronco das curvas de crescimento ocorrem, em geral, de novembro-dezembro (final do período seco/início do chuvoso) e maio-junho (final do período chuvoso/início da fase mais seca), respectivamente. O mesmo padrão foi observado na Costa Rica, para espécies decíduas – *Cedrela odorata*, *Cordia alliodora* e *Bombacopsis quinata* – com o máximo (maio-junho) e mínimo (novembro-dezembro) períodos de crescimento, mostrando 6 meses de crescimento alternados com 6 meses de repouso. As espécies perenifólias – *Pinus caribaea*, *P. pseudostrobus* e *Eucalyptus saligna* – mostram 6 meses de alta taxa de atividade seguidos de 6 meses de baixa atividade relacionadas com as variações climáticas no ano (Lojan, 1967).

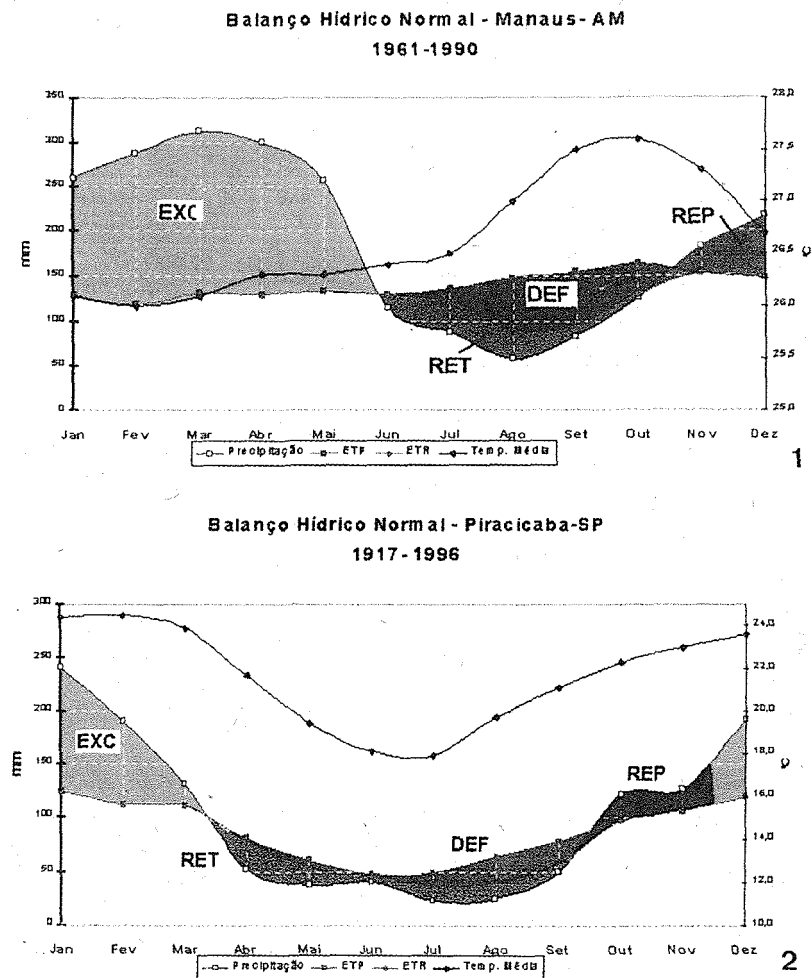


Figura 5 – Balanço hídrico normal. 1. Região de Manaus (1961-1990). 2. Região de Piracicaba (1917-1996)

Matas Mesófilas Semidecíduas – SP

Em quatro áreas de mata mesófila semidecídua da região Sudeste do estado de São Paulo, foram implantadas bandas dendrométricas em 148 árvores de 22 espécies (Tabela 1), sendo realizadas leituras por 6-7 meses, a cada 30 dias, para determinar o ritmo, a taxa de crescimento e a atividade cambial das árvores.

Tabela 1 – Espécies florestais de Matas Mesófilas Semidecíduas – estado de São Paulo

Espécies	Família Botânica		Áreas experimentais (*)						
	AG	Nº	PF	Nº	IB	Nº	TP	Nº	Nº Individuais
Guarantã (<i>Esenbeckia leiocarpa</i>)	X	6	-	-	X	12	X	9	27
Araribá (<i>Centrolobium tomentosum</i>)	-	-	X	9	X	6	-	-	15
Copaíba (<i>Copaifera langsdorffii</i>)	X	6	X	8	-	-	-	-	14
Pau jacaré (<i>Piptadenia gonocantha</i>)	X	5	-	-	X	6	-	-	11
Jequitibá branco (<i>Cariniana estrellensis</i>)	X	5	X	2	-	-	X	4	11
Pau marfim (<i>Balfourodendron riedelianum</i>)	X	5	-	-	-	-	X	5	10
Cedro (<i>Cedrela fissilis</i>)	X	3	X	6	-	-	-	-	9
Saguaraçá (<i>Colubrina glandulosa</i>)	X	5	-	-	-	-	-	-	5
Cumarú (<i>Dipteryx alata</i>)	X	5	-	-	-	-	-	-	5
Ipê amarelo (<i>Tabebuia serratifolia</i>)	X	5	-	-	-	-	-	-	5
Pau ferro (<i>Caesalpinia ferrea</i>)	X	5	-	-	-	-	X	5	5
Guaratuva (<i>Savia dyctiocarpa</i>)	-	-	-	-	X	5	-	-	5
Jequitibá rosa (<i>Cariniana legalis</i>)	-	-	X	4	-	-	-	-	4
Angico (<i>Anadenanthera macrocarpa</i>)	X	3	-	-	-	-	-	-	3
Cedro (<i>Cedrela odorata</i>)	X	3	-	-	-	-	-	-	3
Fruta de pomba (<i>Guazuma ulmifolia</i>)	-	-	X	3	-	-	-	-	3
Jacarandá paulista (<i>Machaerium villosum</i>)	-	-	X	3	-	-	-	-	3
Marolinho (<i>Aegiphila sellowiana</i>)	-	-	X	3	-	-	-	-	3
Peróba (<i>Aspidosperma polyneuron</i>)	-	-	X	1	X	2	-	-	3
Cabreúva (<i>Myroxylon balsamum</i>)	X	2	-	-	-	-	-	-	2
Ipê felpudo (<i>Zeyheria tuberculosa</i>)	-	-	X	1	-	-	-	-	1
Jatobá (<i>Hymenaea courbaril</i>)	-	-	X	1	-	-	-	-	1
Nº Total de árvores	AG	53	PF	41	IB	31	TP	23	148

(*) AG: Arboreto da Duratex S. A. – Agudos/SP (plantios de idade conhecida); IB: Estação Ecológica de Ibicatu – Piracicaba/SP; PF: Reserva Estadual de Porto Ferreira – Porto Ferreira/SP; TP: Estação Experimental de Tupi – Piracicaba/SP (plantios de idade conhecida).

Os resultados das avaliações iniciais do crescimento em circunferência mostram tendência de redução do incremento, geralmente a partir de março-abril, para cedro (*Cedrela fissilis*), copaíba (*Copaifera langsdorffii*), araribá (*Centrolobium tomentosum*), ipê amarelo (*Tabebuia serratifolia*), pau marfim (*Balfourodendron riedelianum*) e jequitibá branco (*Cariniana estrellensis*), resultado da diminuição e/ou cessação da atividade cambial decorrentes da taxa de precipitação (início do déficit hídrico; Figura 5.2) e das temperaturas mais baixas dos meses que antecedem o início do inverno (Figuras 6.1 e 6.6). Espécies como cumarú (*Dipteryx alata*) (Figura 6.7) e guarantã (*Esenbeckia leiocarpa*) (Figura 6.8) apresentam ritmo de crescimento em circunferência com taxa menor, porém contínuas no período. A exemplo das espécies florestais da Amazônia, as árvores de uma espécie nas matas mesófilas semidecíduas apresentam ritmo e taxas de crescimento diferenciados, relacionados com o vigor, a idade, a potencialidade genética e as condições de crescimento individual da espécie no povoamento, como enfatizado por Détienne et alii, (1988) e Worbes (1989).

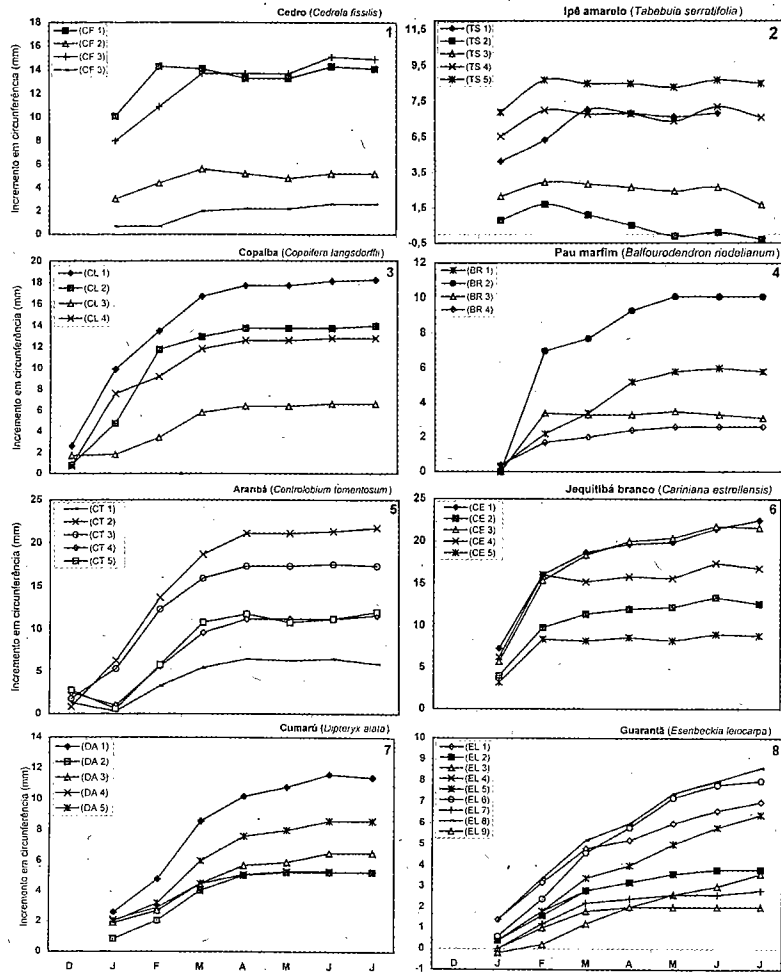


Figura 6 – Incremento em circunferência (IC) acumulado do tronco de árvores. 1. Cedro (*Cedrela fissilis*). 2. Ipê amarelo (*Tabebuia serratifolia*). 3. Copaíba (*Copaifera langsdorffii*). 4. Pau marfim (*Balfourodendron riedelianum*). 5. Araribá (*Centrolobium tomentosum*). 6. Jequitibá branco (*Cariniana estrellensis*). 7. Cumarú (*Dipteryx alata*). 8. Guarantã (*Esenbeckia leiocarpa*)

Marcações cambiais

Tipos e aplicação

O método dinâmico de marcação cambial para o estudo do crescimento do tronco das árvores induz ferimentos das células da camada cambial, proporcionando, pela cicatrização dos tecidos, a marcação do xilema e a determinação da data da aplicação da injúria. Compreende a técnica (1) da inserção de agulha ou de prego fino utilizado por Wolter (1968), Shiokura (1989), Nobuchi et alii (1995) e (2) da janela empregada por inúmeros pesquisadores (Mariaux, 1967a, 1967b, 1969, 1970; Détienne e Mariaux, 1975, 1977; Détienne, 1976; Vetter e Botosso, 1988, 1989a; Détienne, 1989; Botosso e Vetter, 1991; Cardoso, 1991; Sass et alii, 1995 e Botosso et alii, 2000).

O método da agulha ou do prego fino, desenvolvido por Wolter (1968) com alfinetes entomológicos, foi modificado por Shiokura (1989), inserindo pregos de aço com 1 x 35 mm (diâmetro x comprimento) a cada 3 meses no tronco das árvores, com martelo, até atingir a região cambial. Nobuchi et alii (1995) utilizaram pregos de 2 mm de diâmetro e marcações (injúrias) mensais do câmbio, enquanto Luchi (1998) empregou pregos de aço de 1.5 x 22 e 2 x 30 mm (diâmetro x comprimento) a cada 5 e 7 meses. O método de inserção de agulha tem sido importante no estudo das relações entre fenômenos sazonais, periodicidade da atividade cambial e da formação da madeira em árvores de regiões temperadas (Shimaji e Nagatsuka, 1971; Yoshimura et alii, 1981a, 1981b; Kuroda e Shimaji, 1983, 1984; Gellinek, 1997; Möller, 1997) e mesmo nos trópicos (Shiokura, 1989; Luchi, 1998).

Em geral, as marcações cambiais são realizadas uma vez por ano na estação seca ou de menor índice de precipitação pluviométrica, quando a atividade cambial das árvores diminui ou cessa (Détienne, 1989; Botosso et alii, 2000) ou em intervalos menores (Shiokura, 1989; Sass et alii, 1995; Nobuchi et alii, 1995), dependendo dos objetivos da pesquisa.

Exemplos de aplicação

Em todas árvores selecionadas foram feitas aberturas na casca do seu tronco, na altura do DAP, nas dimensões de 0,5 x 5 cm (largura x altura) (Figura 1.2, seta). A abertura de janelas na casca induz ferimentos na camada cambial e com a cicatrização a marcação do xilema secundário, e será realizada uma vez por ano na estação seca, por um período de 3 anos, para análise das cicatrizes e sua datação, para fins dendrocronológicos.

Aplicação em estudos dendrocronológicos

Dos processos de crescimento e desenvolvimento de uma árvore; o crescimento do tronco constitui uma das formas pelas quais o vegetal manifesta o efeito dos fatores ambientais (Schweingruber, 1996). Nesse aspecto, os estudos relacionando o ritmo do crescimento das árvores a (1) formação e queda das acículas, folhas e flores, (2) desenvolvimento e maturação dos frutos e (3) formação das camadas de crescimento no xilema, têm sido especialmente direcionados às espécies de regiões temperadas (Böhm, 1983).

Os estudos do crescimento em circunferência do tronco das árvores das espécies tropicais, como a *Terminalia superba*, pela aplicação de faixas dendrométricas e sua relação com a fenologia, periodicidade dos anéis de crescimento anuais e precipitação pluviométrica realizados por Mariaux (1969, 1970) e Détienne e Mariaux (1977) na África Equatorial constituem em um dos poucos exemplos de pesquisas na área (Figura 7.1). Com os valores de precipitação de três países africanos, com diferentes regimes de chuvas, de clima tropical, demonstrou-se que o período de maior atividade cambial ou de formação da madeira corresponde à fase mais longa de permanência das folhas nas árvores, sendo que, no Congo e na Costa do Marfim, a estação seca coincide com a queda das folhas e dormência cambial (Figura 7.2). Segundo Mariaux (1969, 1970), o ritmo da atividade cambial parece ser estabelecido geneticamente, sendo possível o conhecimento da sazonalidade do câmbio, do comportamento fenológico e da periodicidade de formação de anéis de crescimento anuais, como em *Terminalia superba*, para determinar a idade e a taxa de crescimento de árvores tropicais, possibilitando a identificação de espécies potencialmente importantes para estudos dendrocronológicos.

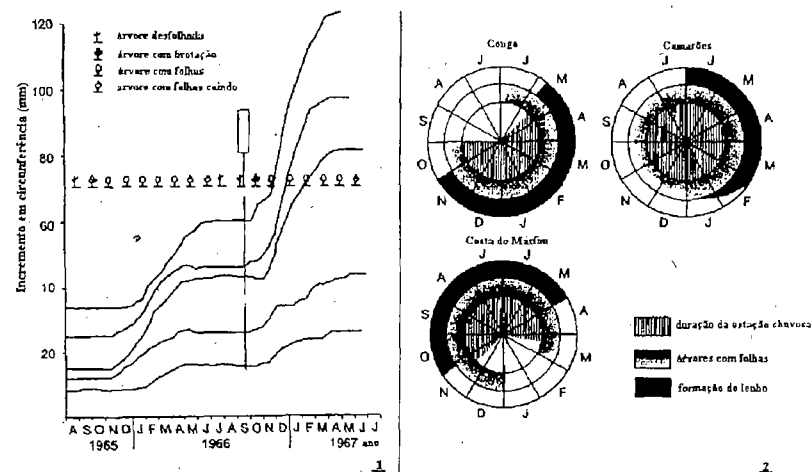


Figura 7 – 1. Incremento em circunferência (IC – em mm) acumulado do tronco de *Terminalia superba* e relação com a fenologia das árvores no Congo (África), com a formação do lenho iniciando-se com a brotação das folhas (atividade cambial) e paralisada com a queda das folhas (dormência do câmbio). 2. Relações entre a formação do lenho, fenologia e precipitação pluviométrica em três países africanos (Mariaux, 1969)

O cedro (*C. odorata*) apresenta, pela variação da atividade cambial das árvores e da fenologia, em resposta ao clima, anéis de crescimento com padrão anatômico característico e bem definido (Worbes, 1989, 1995; Vetter e Botosso, 1989a e b e Botosso et alii, 2000). As camadas de crescimento são facilmente distinguíveis em nível macro e microscópico, pelo parênquima axial inicial, envolvendo parcialmente os poros de maior diâmetro no lenho inicial, formando anéis semiporosos (Figuras 8.1, 8.2). Os estudos de periodicidade da formação dos anéis de crescimento por marcações cambiais anuais indicam que as faixas do parênquima axial são formadas no reinício da atividade do câmbio vascular no período de emissão da nova brotação, com a retomada do crescimento em diâmetro possibilitando a datação das árvores (Détienne, 1976, 1989). Da mesma forma, na Selva Misionera (Argentina) as árvores de *C. fissilis* demarcam os anéis de crescimento anuais e a anatomia da sua madeira é similar à

de *C. odorata*, indicando-a como potencial para a dendrocronologia por Boninsegna et alii (1989) e Tomazello et alii (2000), e possibilitando a construção de série dendrocronológica para uma árvore/espécie (Figura 9).

A interpretação e comparação das curvas de crescimento de diversas espécies, executadas por programas específicos de computador, possibilitam a identificação de áreas de sincronização, sendo que a sobreposição dessas curvas de crescimento possibilita a elaboração de uma série dendrocronológica regional de determinado período de tempo. Quando a largura dos anéis de crescimento é correlacionada aos dados climáticos, torna possíveis a reconstrução da curva de precipitação pluviométrica e a identificação das variações climáticas ocorridas em épocas passadas.

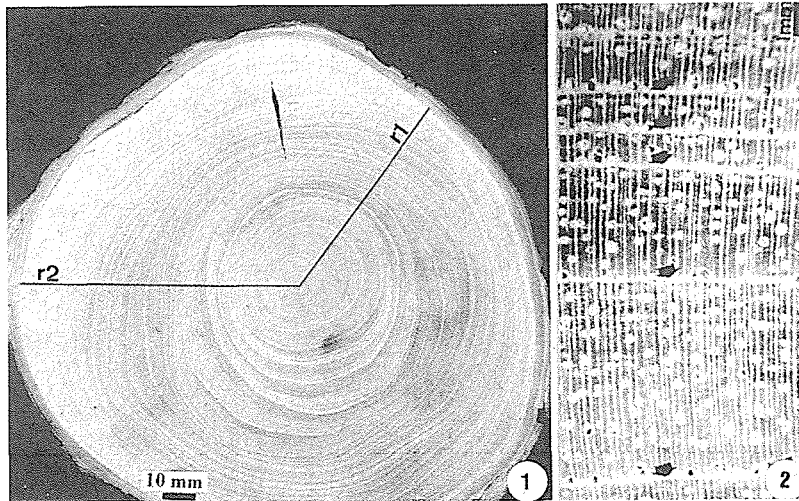


Figura 8 – Seção transversal do lenho de cedro (*Cedrela odorata*). 1. Disco de madeira evidenciando os anéis de crescimento anuais e indicando os raios (r1 e r2) selecionados. 2. Aspecto macroscópico mostrando os anéis de crescimento anuais delimitados por faixas de parênquima axial inicial em associação com anéis semiporosos

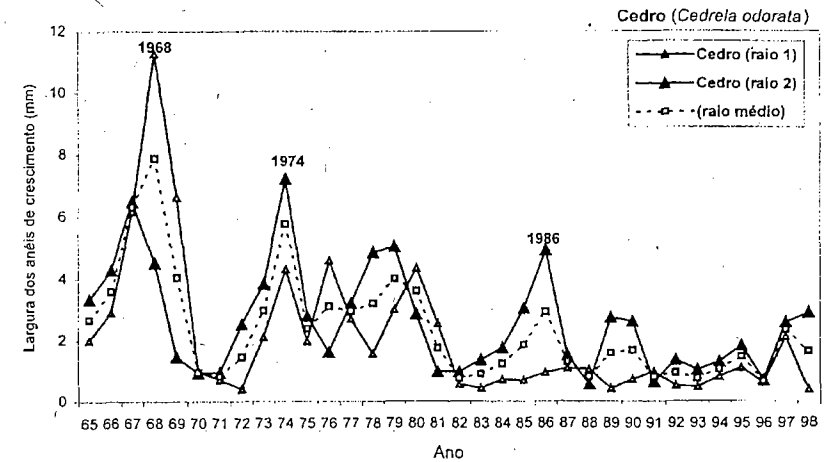


Figura 9 – Variação da largura dos anéis de crescimento anuais de cedro (*Cedrela odorata*) pela avaliação dos raios r1 e r2

Considerações finais

O uso de faixas dendrométricas permanentes tem se mostrado indispensável na medição contínua do crescimento em circunferência do tronco das árvores tropicais e subtropicais, pela possibilidade de avaliar pequenas mudanças no seu crescimento em intervalos de tempo relativamente reduzidos. Para as três espécies de floresta de Terra Firme, na Amazônia, as taxas e o ritmo de crescimento em circunferência do tronco das árvores estão estreitamente relacionados com a precipitação, mostrando a mesma sazonalidade da pluviometria do ecossistema. O crescimento do tronco das árvores das matas mesófilas semidecíduas do Sudeste do estado de São Paulo, nas avaliações realizadas, revela sua estreita relação com a disponibilidade de água (balanço hídrico) na estação chuvosa, ocorrendo a redução e/ou cessação da atividade cambial das árvores na estação seca (inverno). A mensuração contínua das faixas dendrométricas possibilitará, a médio e longo prazos, o entendimento da dinâmica das populações florestais e o crescimento das espécies. Associado à análise da periodicidade de formação dos anéis de crescimento, através das marcações cambiais datadas, é possível determinar a idade e a taxa de crescimento das árvores, identificando as espécies potenciais para estudos dendrocronológicos e indicadores ambientais como os cedros (*Cedrela odorata* e *C. fissilis*).

Referências bibliográficas

- AKACHUKU, A. E. (1984). The effects of some internal and external factors on growth rate of *Lovoa trichilioides* deduced from its wood anatomy. *IAWA Bulletin*, Leiden, v. 5, n. 10, pp. 75-80.
- AMOBI, C. C. (1973). Periodicity of wood formation in some trees of lowland rain forest in Nigeria. *Annals of Botany*, v. 37, pp. 211-218.
- ANDRAE, F. e PREUHSLER, T. (1995). Precise measurement of increment with band dendrometers, especially the Dial-Dendro. *Methods of continuous increment measurement*. (Seminar held 12 September 1994, Freising, Germany). Forstliche Forschungsberichte Munchen, n. 153, pp. 76-89.
- BHATTACHARYYA, A.; YADAV, R. R.; BORGAONKAR, H. P. e PANT, G. B. (1992). Growth analysis of Indian tropical trees: dendroclimatological potential. *Current Science*, v. 62, n. 11, pp. 736-741.
- BÖHM, E. (ed.) (1983). Wurzelökologie und ihre Nutzenanwendung. *Int. Symp. 27 - 29 Sept. 1982. Bundesanstalt für alpenländische Landwirtschaft*.
- BONINSEGNA, J. A.; VILLALBA, R.; AMARILLA, L. e OCAMPO, J. (1989). Studies on tree rings, growth rates and age-size relationships of tropical tree species in Misiones, Argentina. *IAWA Bulletin*, Leiden, v. 10, n. 2, pp. 161-169.
- BORMANN, F. H. e KOZLOWSKI, T. T. (1962). Measurements of tree growth with dial gauge dendrometers and vernier tree ring bands. *Ecology*, v. 43, pp. 289-294.
- BOTOSSO, P. C. e VETTER, R. E. (1991). Alguns aspectos sobre a periodicidade e taxa de crescimento em 8 espécies arbóreas tropicais de Floresta de Terra Firme (Amazônia). *Revista do Instituto Florestal*, v. 3, n. 2, pp. 163-180.
- BOTOSSO, P. C.; VETTER, R. E. e TOMAZELLO FILHO, M. (2000). Periodicidade e taxa de crescimento de árvores de cedro (*Cedrela odorata* L., Meliaceae), jacareúba (*Calophyllum angulare* A. C. Smith, Clusiaceae) e muirapiranga (*Eperua*

- bijuga* Mart. ex Benth, Leg. Caesalpinoideae) de floresta de Terra Firme, em Manaus-AM. In: ROIG, F. A. *Dendrocronología en América Latina*. Mendoza, Ediunc.
- BROWN Jr., C. T.; ROSE, R. C. e SPURR, S. H. (1947). The dial gauge dendrometer as a tool in silvicultural research. *Journal of Forestry*, v. 45, n. 2, pp. 102-104.
- BYRAM, G. M. e DOOLITTLE, W. T. (1950). A year of growth for a shortleaf pine. *Ecology*, v. 31, pp. 27-35.
- CARDOSO, N. S. (1991). *Caracterização da estrutura anatômica da madeira, fenologia e relações com a atividade cambial de árvores de Teca (Tectona grandis L.) - Verbenaceae*. Dissertação de mestrado. Piracicaba, Esalq/DCF, USP.
- CATINOT, R. (1970). Premières réflexions sur une possibilité physiologique des rythmes annuels d'accroissement chez les arbres de la forêt tropicale africaine. *Bois et Forêts des Tropiques*, Nogent-sur-Marne, n. 131, pp. 3-10.
- DAUBENMIRE, R. F. (1945). An improved type of precision dendrometer. *Ecology*, v. 26, pp. 97-98.
- DÉTIENNE, P. (1976). *Nature et périodicité des cernes dans le bois d'Iroko*. Nogent-sur-Marne, Centre Technique Forestier Tropical, pp. 1-20.
- _____. (1989). Appearance and periodicity of growth rings in some tropical woods. *IAWA Bulletin*, Leiden, v. 10, n. 2, pp. 123-132.
- DÉTIENNE, P.; BARBIER, C.; AYPHASSORHO, H. e BERTIN, F. (1988). Rythmes de croissance de quelques essences de Guyane Française. *Bois et Forêts des Tropiques*, Nogent-sur-Marne, v. 217, pp. 63-76.
- DÉTIENNE, P. e MARIAUX, A. (1977). Nature et périodicité des cernes dans le bois rouges de Méliacées africaines. *Bois et Forêts des Tropiques*, Nogent-sur-Marne, v. 175, pp. 53-61.
- DÉTIENNE, P. e MARIAUX, A. (1975). Nature et périodicité des cernes dans le bois de Niagon. *Bois et Forêts des Tropiques*, v. 159, pp. 29-37.

- DÉTIENNE, P. e MARIAUX, A. (1976). Nature et périodicité des cernes dans le bois de Samba. *Bois et Forêts des Tropiques*, Nogent-sur-Marne, v. 169, pp. 29-35.
- DOWNES, G. M.; BEADLE, C.; GENSLER, W.; MUMMERY, D. e WORLEDGE, D. (1999). "Diurnal variation and radial growth of stems in young plantation eucalypts". In: WIMMER R. e VETTER, R. E. *Tree-ring analysis: biological, methodological and environmental aspects*. Cabi International, Londres.
- FAHN, A.; BURLEY, J.; LONGMAN, K. A.; MARIAUX, A. e TOMLINSON, P. B. (1981). Possible contributions of wood anatomy to the determination of the age of tropical trees. In: BORMANN, F. H. e BERLYN, G. *Age and growth rate of tropical trees: new directions for research*. Yale University, School of Forestry & Environmental Studies, Bulletin n. 94, pp. 31-54.
- FRITTS, H. C. e FRITTS, E. C. (1955). A new dendrograph for recording radial changes of a tree. *Forestry Sciences*, v. 1, pp. 271-276.
- FRITTS, H. C. (1976). *Tree rings and climate*. New York, Academic Press.
- GAST, H. J. (1996). An increment-measuring dendrometer. *AFZ Der Wald, Allgemeine-Forst-Zeitschrift-fur-Waldwirtschaft und Umweltvorsorge*, v. 51, n. 10, pp. 558-559.
- GAZEL, M. (1983). Croissance des arbres et productivité des peuplements en forêt dense équatoriale de Guyane, *O.N.F.*, Direction Régionale de Guyane, Guiana Francesa.
- GELLINEK, H. (1997). *Kambiumdynamik von Birke und Kiefer an der borealen Waldgrenze in Lappland*. Universität Hamburg.
- GOURLAY, I. D. (1995). The definition of seasonal growth zones in some african *Acacia* species – a review. *IAWA Journal*, Leiden, v. 16, n. 4, pp. 353-359.
- HALL, R. C. (1944). A verneer tree-growth band. *Journal of Forest*, v. 42, pp. 742-743.

- JALIL, N. R. A.; ITOH, T.; SAHRI, M. H. e JUSOH, M. Z. (1998). Periodicity of xylem growth of rubberwood (*Hevea brasiliensis*) grown in Malaysia. *Holzforschung*, v. 52, pp. 567-572.
- KAENNEL, M. e SCHWEINGRUBER, F. H. (1995). *Multilingual glossary of dendrochronology. Terms and definitions in english, german, french, spanish, italian, portuguese and russian*. Berne, Haupt.
- KÄTSCH, C.; AGUIRRE, O. e KRAMER, H. (1992). Untersuchungen des kurzfristigen Dickenzuwachses in ungleichaltrigen Mischbeständen Mexikos. *Forstarchiv.*, v. 63, pp. 66-73.
- KILLMANN, W. e THONG, H. L. (1995). The periodicity of growth in tropical trees with special reference to Dipterocarpaceae – a review. *IAWA Journal*, Leiden, v. 16, n. 4, pp. 329-335.
- KOMIYAMA, A.; INOUE, S. e ISHIKAWA, T. (1987). Characteristics of the seasonal diameter growth of twenty-five species of deciduous broadleaved trees. *Journal of the Japanese Forestry Society*, v. 69, pp. 379-385.
- KORIBA, K. (1958). On the periodicity of tree-growth in the tropics, with reference to the mode of branching, the leaf fall and the formation of resting bud. *Gardner's Bulletin*, v. 17, pp. 11-81.
- KURODA, K. e KIYONO, Y. (1997). Seasonal rhythms of xylem growth measured by the wounding method and with a band-dendrometer: an instance of *Chamaecyparis obtusa*. *IAWA Journal*, Leiden, v. 18, n. 3, pp. 291-299.
- KURODA, K. e SHIMAJI, K. (1983). Traumatic resin canal formation as a marker of xylem growth. *Forest Science*, v. 29, pp. 653-659.
- KURODA, K. e SHIMAJI, K. (1984). Wound effects on xylem cell differentiation in a conifer. *IAWA Bulletin*, Leiden, n. 5, pp. 295-305.
- KUROIWA, K. (1957). Daily growth curve of *Paulownia* (I). On the "mirror dendrometer". *Journal of the Japanese Forestry Society*, v. 39, pp. 89-91.

- LIMING, F. G. (1957). Homemade dendrometers. *Journal of Forestry*, v. 55, pp. 575-577.
- LOJAN, L. (1967). Periodicidad del clima y del crecimiento de especies forestales en Turrialba, Costa Rica. *Turrialba*, v. 17, n. 1, pp. 71-83.
- LUCHI, A. E. (1998). *Periodicidade de crescimento em Hymenaea courbaril L. e anatomia ecológica do lenho de espécies de mata ciliar*. Tese de doutorado. São Paulo, Instituto de Biociências, USP.
- MacDOUGAL, D. T. (1921). Growth in trees. *Carnegie Inst. Wash. Publ.*, v. 307, pp. 116.
- MARIAUX, A. (1967a). Les cernes dans les bois tropicaux africains, nature et périodicité. *Bois et Forêts des Tropiques*, Nogent-sur-Marne, v. 113, pp. 3-14.
- _____ (1967b). Les cernes dans les bois tropicaux africains, nature et périodicité. *Bois et Forêts des Tropiques*, Nogent-sur-Marne, v. 114, pp. 23-37.
- _____ (1969). La périodicité des cernes dans le bois de Lima. *Bois et Forêts des Tropiques*, Nogent-sur-Marne, v. 128, pp. 39-53.
- _____ (1970). La périodicité de formation des cernes dans le bois de l'Oukoume. *Bois et Forêts des Tropiques*, Nogent-sur-Marne, v. 131, pp. 37-50.
- _____ (1977). Marques et rubans dendromètres. *Information Technique*, v. 238. Nogent-sur-Marne, Centre Technique Forestier Tropical, pp. 1-10.
- _____ (1979) *Nature et périodicité des cernes dans les arbres de zone tropicale sèche en Afrique de l'Ouest*. Nogent-sur-Marne, Centre Technique Forestier Tropical, pp. 1-83.
- MARIAUX, A. (1981). Past efforts in measuring age and annual growth in tropical trees. In: BORMANN, F. H. e BERLYN, G. *Age and growth rate of tropical trees: new directions for research*. Yale University, School of Forestry & Environmental Studies, Bulletin, n. 94. pp. 20-30.

- MARIEN, J. N. e THIBOUT, H. (1980). Les Eucalyptus en France: rythmes de croissance en fonction des conditions climatiques. *Annales de Recherches Sylvicoles (Afofel)*, pp. 273-299.
- MESAVAGE, C. e SMITH, W. S. (1960). Timesavers for installing dendrometer bands. *Journal of Forestry*, v. 58, pp. 396.
- MÖLLER, R. (1997). *Holzbildung von Robinie und Buche im Verlauf einer Vegetationsperiode*. Universität Hamburg.
- NJOKU, E. (1963). Seasonal periodicity in the growth and development of some forest trees in Nigeria. I. Observations on the mature trees. *Journal of Ecology*, v. 51, pp. 617-624.
- NOBUCHI, T.; OGATA, Y. e SIRIPATANADILOK, S. (1995). Seasonal characteristics of wood formation in *Hopea odorata* and *Shorea henryana*. *IAWA Journal*, Leiden, v. 16, n. 4, pp. 361-369.
- NORDANSTIG, J. (1998). Short term dynamics of diameter increment of young *Acacia mangium* in forest plantation on former tropical rain forest soil in Sabah, Malaysia. *Swedish University of Agricultural Sciences*, Uppsala, Suécia, n. 56, pp. 1-17.
- PESONEN, E.; MIELIKAINEN, K. e PREUHSLE, T. (1995). Measuring band for automatic monitoring of increment! In: *Methods of continuous increment measurement*. (Seminar held 12 September 1994, Freising, Germany). Forstliche Forschungsberichte Munchen, n. 153, pp. 59-63.
- PRÉVOST, M. F. e PUIG, H. (1981). Accroissement diamétral des arbres en Guyane: observations sur quelques arbres de forêt primaire et de forêt secondaire. *Bull. Natn. Hist. Nat.*, Paris, sér. 4, 3, Sect. B, Adansonia, n. 2, pp. 147-171.
- SASS, U.; KILMANN, W. e ECKSTEIN, D. (1995). Wood formation in two species of Dipterocarpaceae in Peninsular Malaysia. *IAWA Journal*, Leiden, v. 16, n. 4, pp. 371-384.
- SCHULZ, J. P. (1960). *The vegetation of Surinam. Vol. II: ecological studies on rain forest in northern Surinam*. Amsterdam, Van Eedenfonds.

- SCHWEINGRUBER, F. H. (1996). *Tree rings and environment – Dendroecology*. Bern, Paul Haupt Publishers.
- SHIMAJI, K. e NAGATSUKA, Y. (1971). Pursuit of the time sequence of annual ring formation in Japanese fir (*Abies firma* Sieb. Et Zucc.) *Journal of the Japan Wood Research*, 17, pp. 122-128.
- SHIOKURA, T. (1989). A method to measure radial increment in tropical trees. *IAWA Bulletin*, Leiden, v. 10, n. 2, pp. 147-154.
- TABUCHI, R. e TAKAHASHI, K. (1998). The development of a new dendrometer and its application to deciduous broadleaf tree species in Hokkaido, northern Japan. *Journal of Sustainable Forestry*, v. 6, ns. 1-2, pp. 23-34.
- TAKAHASHI, K. e TABUCHI, R. (1990). "A model of a high-fidelity dendrometer". In: NODA, M. *Tree rings*. Research Reactor Institute, Kyoto University, Kyoto.
- TOMAZELLO FILHO, M. e CARDOSO, N. S. (1999). "Seasonal variations of the vascular cambium of teak (*Tectona grandis* L.) in Brazil". In: WIMMER, R. e VETTER, R. E. *Tree-ring analysis: biological, methodological and environmental aspects*. Cabi International, Londres.
- TOMAZELLO FILHO, M.; BOTOSSO, P. C. e LISI, C. S. (2000). "Potencialidade da família Meliaceae para dendrocronologia em regiões tropicais e subtropicais". In: ROIG, F. A. *Dendrocronologia en América Latina*. Mendoza, Ediunc.
- TRYON, H. H. e FINN, R. F. (1949). On obtaining precise diameter measurements on hardwoods using the dial gauge. *Journal of Forestry*, v. 47, pp. 396-397.
- VETTER, R. E. (1995). *Untersuchungen über Zuwachsrhythmen na tropischen Bäumen in Amazonien*. Universität Freiburg.
- VETTER, R. E. e BOTOSSO, P. C. (1988). Observações preliminares sobre a periodicidade e taxa de crescimento em árvores tropicais. *Acta Amazônica*, Manaus, v. 18, n. 1-2, pp. 189-196.
- VETTER, R. E. e BOTOSSO, P. C. (1989a). Remarks on age and growth rate determination of Amazonian trees. *IAWA Bulletin*, Leiden, v. 10, n. 2, pp. 133-145.

- ____ (1989b). El Niño may affect growth behaviour of Amazonian trees. *GeoJournal*, Kluwer Academic Publishers, v. 19, n. 4, pp. 419-421.
- WOLTER, K. E. (1968). A new method for marking xylem growth. *Forest Science*, v. 14, pp. 102-104.
- WORBES, M. (1985). Structural and other adaptations to long-term flooding by trees in Central Amazonia. *Amazoniana*, v. 9, n. 3, pp. 459-484.
- ____ (1986). Lebensbedingungen und Holzwachstum in zentral amazonischen Überschwemmungswäldern. *Scripta Geobotanica*, v. 17, pp. 1-112.
- ____ (1989). Growth rings, increment and age of trees in inundation forests, savannas and a mountain forest in Neotropics. *IAWA Bulletin*, Leiden, v. 10, n. 2, pp. 109-122.
- ____ (1995). How to measure growth dynamics in tropical trees – a review. *IAWA Journal*, Leiden, v. 16, n. 4, pp. 337-351.
- WORBES, M. e JUNK, W. J. (1989). Dating tropical trees by means of ¹⁴C from bomb tests. *Ecology*, v. 70, n. 2, pp. 503-507.
- YOSHIMURA, K.; HAYASHI, S.; ITOH, T. e SHIMAJI, K. (1981a). Studies on the improvement of the pinning method for marking xylem growth. I. Minute examination of pin marks in taeda pine and other species. *Wood Research*, v. 67, pp. 1-16.
- YOSHIMURA, K.; ITOH, T. e SHIMAJI, K. (1981b). Studies on the improvement of the pinning method for marking xylem growth. II. Pursuit of the time sequence of abnormal tissue formation in loblolly pine. *Mokuzai Gakkaishi*, v. 27, pp. 755-760.

Ronaldo Viana Soares

Indicadores de periculosidade e métodos de controle de incêndios em vegetação natural

A ocorrência e a propagação dos incêndios florestais estão intimamente ligadas a condições climáticas favoráveis, e, por esse motivo, as variáveis meteorológicas são universalmente utilizadas como indicadores do perigo de incêndio.

Na verdade, para que ocorra um incêndio, é necessário também que haja material combustível em quantidade suficiente para propagar o fogo e uma fonte de calor que provoque a ignição e desencadeie o processo da combustão. Material combustível sempre existe em uma floresta, porém, condições meteorológicas favoráveis podem torná-lo muito mais inflamável, principalmente pela redução de sua umidade. Fonte de calor, natural (raio) ou humana (acidental, negligência ou proposital), também sempre aparece, de maneira mais ou menos freqüente, para iniciar os incêndios florestais.

Mas, de qualquer maneira, direta ou indiretamente, as condições climáticas são as grandes responsáveis pela ocorrência e, principalmente, pela propagação dos incêndios. Todos os incêndios florestais de alta intensidade registrados no mundo, que causaram grandes tragédias, ocorreram sob condições climáticas extremas. Foi assim com o incêndio de Peshigo, Estados Unidos, em 1871, que matou cerca de 1.500 pessoas; com o incêndio de "ash wednesday" na Austrália, em 1983, que matou 75 pessoas; com o incêndio da China, em 1987, que queimou mais de 3,5 milhões de hectares; com os incêndios da Indonésia, em 1983 e 1997, que queimaram mais 3 milhões de hectares; com o incêndio de Oakland, EUA, em 1991, que matou 25 pessoas e queimou 3.700 casas; e com o incêndio do Para-

na em agosto/setembro de 1963, que queimou cerca de 2 milhões de hectares e matou 110 pessoas, ocorrido após mais de um mês sem nenhuma precipitação e em dias de umidade relativa inferior a 15%.

Os métodos de controle de incêndios em vegetação natural incluem atividades de prevenção e de combate. A prevenção pode ser exercida através da educação das pessoas, visando a redução do número de ocorrências, e da adoção de técnicas que evitem ou dificultem a propagação do fogo. A educação da população é uma medida muito eficiente, porém, a médio e longo prazos, como técnicas preventivas, apesar de apresentarem resultado mais imediato, têm algumas limitações para serem implantadas em áreas de vegetação natural.

Indicadores de periculosidade

Como a ocorrência e a propagação dos incêndios estão intimamente ligadas às condições climáticas, as variáveis meteorológicas constituem, direta ou indiretamente, o meio mais eficiente para se estabelecer o grau de perigo de incêndio em qualquer tipo de vegetação.

As variáveis meteorológicas podem ser usadas diretamente, através de relações empíricas ou, indiretamente, através dos índices de perigo de incêndio, para determinar o grau de periculosidade de incêndios em florestas ou outro tipo de vegetação.

Relações empíricas

As chamadas relações empíricas associam o perigo de incêndio diretamente a uma variável meteorológica, principalmente umidade atmosférica, que é talvez a variável individual mais determinante na probabilidade de ocorrência dos incêndios.

Uma das maneiras de se fazer uma previsão empírica do perigo de incêndio é determinar a umidade relativa do ar às 10 horas da manhã. Se ela for igual ou menor do que 30%, o dia será propício à ocorrência de incêndios.

Outra previsão empírica é determinar as temperaturas do ar e do ponto de orvalho, também às 10 horas. Se a diferença entre elas for igual ou maior do que 15°C, haverá perigo de incêndio, pois quanto maior for a diferença entre essas duas temperaturas mais seco estará o ar atmosférico.

Índices de perigo de incêndio

Os índices de perigo de incêndio são usados universalmente para se estabelecer o grau de periculosidade de ocorrência e/ou propagação de incêndios em áreas florestais. Eles são calculados principalmente através de dados meteorológicos, mas podem incluir outras variáveis, tais como umidade e tipo de combustível, probabilidade de incidência de raios e tipos de atividades humanas na área, dependendo do grau de sofisticação do índice.

Mais recentemente, têm sido desenvolvidos os chamados "greenness indices", que poderiam ser traduzidos por índices da aparência da vegetação. Esses índices estimam o perigo de incêndio através da comparação da coloração atual da vegetação com um padrão (verde) que representa um estado ótimo de umidade. Um desses índices (Burgan et alii, 1996), o NDVI, apresenta valores visuais de coloração que variam de 0 (vegetação seca) a 100 (vegetação verde). Apesar de usar a aparência ou coloração da vegetação como indicativo da periculosidade de incêndios, esses índices são também influenciados pelas condições climáticas. Isso porque longos períodos de estiagem e ocorrência de geadas são responsáveis pela seca (e, conseqüentemente, mudanças de coloração) da vegetação. A vantagem desses índices é que podem ser estimados através de imagens de satélites, cobrindo extensas áreas sem a necessidade de coleta de dados meteorológicos. Mas, por enquanto, índices desse tipo ainda não foram desenvolvidos para as condições e tipos de vegetação brasileiros.

Os índices usados atualmente no Brasil são os do tipo "índices de inflamabilidade", que indicam o grau de probabilidade de ocorrência de incêndios, mas não incluem o fator vento, o que serviria para se ter uma idéia melhor do risco de propagação do fogo. O motivo de não se utilizarem índices mais sofisticados no país é a dificuldade de se obter os dados meteorológicos necessários aos seus cálculos.

Logo após o catastrófico incêndio do Paraná, em 1963, o Serviço Nacional de Meteorologia propôs a introdução do cálculo de índices de perigo no Brasil e sugeriu a utilização de dois índices, o de Angstrom, desenvolvido na Suécia, e o de Nesterov, desenvolvido na então União Soviética, por considerá-los adequados às condições do país, já que exigiam apenas temperatura, umidade relativa e precipitação para seus cálculos.

Desenvolvidos no hemisfério Norte, onde os incêndios florestais ocorrem predominantemente no verão, esses índices conferem à temperatura do ar um maior peso na determinação do grau de perigo. No Brasil, entretanto, os incêndios ocorrem principalmente no inverno e no início da primavera e a variável meteorológica mais associada à ocorrência dos incêndios é a umidade relativa do ar (Soares, 1972). Por esse motivo os índices de Nesterov e, principalmente, de Angstrom não foram muito eficientes na determinação do grau de perigo de ocorrência de incêndios no país.

Fórmula de Monte Alegre – Atualmente, o índice de perigo de incêndio mais usado no Brasil é a Fórmula de Monte Alegre (FMA), desenvolvida através de dados meteorológicos e de ocorrências de incêndios na região central do estado do Paraná (Soares, 1972).

A FMA é um índice acumulativo, para cujo cálculo são requeridos valores diários de umidade relativa do ar e de precipitação, além do número de dias sem chuva. É um índice de estrutura bastante simples, fácil de calcular, e por isso pode ser usado sem maiores problemas em qualquer parte do país, desde que se disponha de um psicrômetro e um pluviômetro, aparelhos baratos e fáceis de operar. A equação básica do índice é a seguinte:

$$FMA = \sum_{n=1}^n \frac{100}{H}$$

onde: *FMA* é a Fórmula de Monte Alegre,
H é a umidade relativa do ar em porcentagem, medida às 13:00 horas
n é o número de dias sem chuva.

Como todo índice acumulativo, os valores obtidos diariamente vão sendo somados até que ocorra uma precipitação, que poderá

reduzir parcial ou totalmente o valor do índice. As reduções nos valores do índice são feitas de acordo com o quadro de restrições (Quadro 1):

Quadro 1 – Restrições ao somatório do índice, de acordo com a quantidade de precipitação

CHUVA DO DIA (mm)	MODIFICAÇÕES NO CÁLCULO
< 2,5	Nenhuma.
2,5 - 4,9	Abater 30% na FMA calculada na véspera e somar 100/H do dia.
5,0 - 9,9	Abater 60% na FMA calculada na véspera e somar 100/H do dia.
10,0 - 12,9	Abater 80% na FMA calculada na véspera e somar 100/H do dia.
> 12,9	Abandonar o cálculo (FMA = 0) e recomençar no dia seguinte ou quando a chuva cessar.

Os valores da FMA, calculados diariamente, indicam os graus de perigo de incêndios dos respectivos dias (Quadro 2).

Quadro 2 – Graus de perigo de incêndio da FMA de acordo com sua escala original

VALOR DA FMA	GRAU DE PERIGO
Até 1,0	Nulo
1,1 - 3,0	Pequeno
3,1 - 8,0	Médio
8,1 - 20,0	Alto
> 20,0	Muito Alto

Atualmente, existe a tendência de se usarem índices nacionais, isto é, aplicar a mesma metodologia para todo o país, como acontece, por exemplo, na Austrália (McArthur, 1966), no Canadá (Canadian Forestry Service, 1970), na Espanha (Velez, 1991) e nos Estados Unidos (Deeming et alii 1972). Isso facilita bastante o cálculo e a

difusão dos índices. A pergunta que muitas vezes se faz, nesse caso, é como um único índice pode estimar o grau de perigo de incêndio de regiões climaticamente tão diferentes, em países de grande extensão territorial? A resposta é: ajustando-se, a escala de perigo para as condições locais. Desse modo, utiliza-se a mesma metodologia, mas as escalas de perigo são diferentes, de acordo com as características climáticas da região. Isto já está sendo feito no Brasil, através de estudos para a adaptação da FMA para regiões dos estados de Santa Catarina (Soares, 1998a), São Paulo (Sampaio, 1999) e Minas Gerais.

Um exemplo da diferença climática entre duas regiões brasileiras, refletida na periculosidade de incêndios, pode ser observado na Tabela 1, na qual é mostrada a distribuição anual dos números de dias por grau de perigo da FMA para Brasília, DF (Lemos e Gama, 1978) e para Três Barras, SC (Soares, 1998).

Tabela 1 – Distribuição anual do número de dias por classe de perigo da FMA para as regiões de Brasília, DF (média de 3 anos) e Três Barras, SC (média de 8 anos)

GRAU DE PERIGO	NÚMERO DE DIAS			
	Brasília		Três Barras	
	Nº	%	Nº	%
Nulo	37	10,1	42	11,5
Pequeno	52	14,2	46	12,6
Médio	73	20,0	91	25,0
Alto	71	19,5	122	33,4
Muito Alto	132	36,2	64	17,5
Total	365	100,0	365	100,0

Analisando-se os dados da Tabela 1, observa-se que, considerando o número de dias em que, na verdade, não existe risco de incêndio (soma dos graus Nulo e Pequeno), praticamente não existe diferença entre as duas regiões. No entanto, nos graus de perigo Alto e Muito Alto a diferença é muito grande. Como ambas as regiões apresentam condições climáticas distintas daquela onde o índice foi desenvolvido, tanto pode estar subestimando como superestimando o

perigo de incêndio. Somente uma análise incluindo o número real de incêndios ocorridos em cada região permitirá a adequação da escala de perigo.

Quando o índice está bem adaptado, a grande maioria dos incêndios ocorre nos graus de perigo Alto e Muito Alto. O acompanhamento do desempenho da FMA na região onde ela foi desenvolvida, durante 20 anos (1971 a 1990), mostrou que nenhum incêndio ocorreu no grau Nulo, 2,0% ocorreu no grau Pequeno, 13,8% no grau Médio, 31,7% no grau Alto e 52,5% no grau Muito Alto. Portanto, 84,2% dos incêndios registrados na região durante o período estudado ocorreram quando o índice indicava graus de perigo Alto e Muito Alto (Soares, 1998).

Esses dados mostram a importância da determinação diária do grau de perigo no controle dos incêndios em florestas ou outros tipos de vegetação. Quando o índice indica risco Alto ou Muito Alto, a probabilidade de ocorrência de incêndios é realmente muito maior e todo o sistema de controle deve estar preparado para ações rápidas de combate.

Métodos de controle

Os incêndios consomem milhares de hectares de vegetação natural no Brasil a cada ano. Apesar da falta de estatísticas globais no país, algumas informações da literatura e do próprio noticiário da imprensa podem dar uma idéia da magnitude do problema. O incêndio do estado do Paraná, em 1963, é um bom exemplo do poder de destruição do fogo. A área total queimada por aquele incêndio, o maior registrado no país até hoje, foi de cerca de 2 milhões de hectares, quase que totalmente de vegetação nativa, já que a superfície reflorestada até aquela data, na área atingida pelo fogo, não passava de 20.000 ha. Dados coletados apenas em áreas protegidas, incluindo empresas florestais e áreas de conservação, revelaram que mais de 82.000 ha. de vegetação nativa foram queimados entre 1983 e 1987 (Soares, 1989). O incêndio de Roraima, em 1998, segundo informação do Ibama, queimou mais de 3,5 milhões de hectares de vegetação natural, incluindo florestas, savanas e campos.

O controle dos incêndios em vegetação natural compreende as atividades de prevenção e combate, como em todos os incêndios florestais. Entretanto, algumas técnicas, tanto de prevenção como de combate, largamente usadas em plantações florestais, não devem ser usadas quando se trata de vegetação natural, especialmente florestas nativas, por causarem nelas distúrbios que poderiam ser tão severos quanto o próprio fogo.

Prevenção de incêndios em vegetação natural

Os programas de prevenção devem incluir ações em dois sentidos: primeiro, evitar a ocorrência ou o início dos incêndios e, para tanto, é necessário conhecer as principais causas e os locais e épocas de maior incidência do fogo; segundo, é preciso adotar técnicas capazes de reduzir ou dificultar a propagação do fogo, visando a facilitar o combate.

Como quase todos os incêndios, em áreas de florestas ou outros tipos de vegetação, resultam de ações humanas (apenas pouco mais de 2% são causados por raios, segundo Soares (1989), conforme as estatísticas disponíveis, torna-se necessário conscientizar ou educar as pessoas, através da persuasão ou da coerção. A persuasão se obtém através de campanhas e programas educativos e a coerção através da aplicação rigorosa da legislação pertinente.

A educação das pessoas que vivem nas imediações, visitam periodicamente ou transitam por áreas de vegetação natural é uma das técnicas mais eficientes na prevenção dos incêndios. No entanto, as distintas categorias populacionais, de acordo com o ambiente em que vivem, cidade ou campo, reagem de maneira diversa aos apelos das campanhas educativas. Mensagens alarmantes e inadequadas, que exageram as perdas dos recursos naturais, amedrontam a população e podem apresentar efeitos adversos aos pretendidos, como provocar o ceticismo e a resignação das pessoas com respeito à utilidade da prevenção e do combate aos incêndios e, por outro lado, excitar os piromaníacos.

Segundo Calabri (1991), imagens coloridas de chamas intensas em grandes incêndios podem também se converter em faca de dois gumes nas campanhas de prevenção, podendo tanto deter como

encorajar os incendiários. Entretanto, não se pode negar a eficiência de campanhas bem feitas na educação das pessoas e, conseqüentemente, na redução dos incêndios causados por negligência ou falta de conhecimento. O programa de prevenção do Serviço Florestal dos Estados Unidos, há mais de 50 anos apoiado na popularíssima figura do ursinho Smokey, tem sido um sucesso na redução das ocorrências de incêndios naquele país.

No Brasil, a oficialização do tamanduá Labareda como símbolo nacional das campanhas de prevenção de incêndios poderá também ajudar a criar uma imagem positiva, de forte apelo popular, associada à necessidade de preservação ambiental. Além das campanhas de prevenção oficiais, feitas pelo Ibama e pelos estados que possuem programas ativos de controle de incêndios, algumas empresas privadas também têm investido em campanhas próprias, utilizando símbolos regionais (como o indiozinho Caiubí e a ema, por exemplo), com o objetivo de reduzir o problema do fogo em suas áreas de florestas e de preservação permanente.

Quando as campanhas educativas não estiverem dando os resultados esperados, a legislação pertinente deve ser rigorosamente aplicada, a fim de educar os infratores através da coerção. Folkman (1973) relata os resultados de um programa de prevenção de incêndios no município de Butte, Califórnia, EUA, onde a aplicação da legislação foi um dos pontos principais na conscientização do público a respeito da seriedade do problema do fogo. Durante quatro anos de observação, vários foram os casos de condenação de pessoas responsáveis por incêndios e o resultado foi uma sensível redução do número de focos de fogo por causas humanas na região.

A legislação brasileira que trata do problema do fogo em florestas e outros tipos de vegetação é perfeitamente suficiente para inibir ações que levem as pessoas a provocar incêndios, seja por negligência ou maldade. O Código Florestal, a Lei Ambiental, o Decreto Presidencial nº 2661, de 8 de julho de 1998 e a portaria do Ibama nº 94-N de 9 de julho de 1998, fornecem toda a base legal para inibir os incendiários e negligentes que provocam incêndios no meio rural. O problema é que a legislação não tem sido cumprida, primeiro porque a estrutura de fiscalização do governo é muito pequena e insuficiente para atender todo o território nacional e, segundo, devido à ineficiência do poder Judiciário.

Quanto às medidas para evitar ou dificultar a propagação do fogo, o problema é mais complexo, pois não se pode adotar, nas áreas de vegetação natural (pelo menos no mesmo nível de intensidade), as mesmas técnicas usadas em reflorestamento, como as redes de aceiros e a silvicultura preventiva, por exemplo. A redução ou eliminação do material combustível, principalmente nas periferias dessas áreas, parece ser a melhor alternativa para evitar que incêndios vindos de fora nelas penetrem. Queimas controladas ou aceiros podem ser usados para se criarem zonas protetoras, nos limites das áreas de vegetação natural. Na maioria das situações, a queima controlada seria mais indicada, por ser o fogo um elemento mais natural e, portanto, menos agressivo do que o aceiro, em que toda a vegetação é retirada, deixando-se o solo exposto.

A redução ou manejo do material combustível no interior das áreas de vegetação natural somente poderia ser feito com a utilização de queimas controladas nas áreas de cerrado, vegetação considerada "clímax de fogo", e de araucária, espécie resistente ao fogo. As áreas de cerrado, pelas suas características ecológicas, queimam periodicamente, e a maneira mais eficiente para se evitar os incêndios nessas áreas seria a adoção de programas de queima controlada, que supririam a exigência do fogo para a manutenção do ecossistema sem o problema dos grandes incêndios de propagação incontrolada.

Finalmente, o estabelecimento de um zoneamento de riscos de incêndios, com base no mapeamento da vegetação, com suas variações qualitativas e quantitativas de material combustível, no grau de periculosidade, estimado através dos índices de perigo, e nas fontes potenciais de ignição, seria também uma ferramenta muito útil para os programas de prevenção de incêndios em áreas de vegetação natural.

Combate aos incêndios em vegetação natural

O combate aos incêndios, tanto em áreas de vegetação natural quanto em florestas plantadas, envolve a mesma sequência de operações, começando pela detecção e comunicação do fogo, passando pela mobilização e deslocamento da equipe, pelo planejamento do ataque e terminando com a supressão do fogo. No entanto, em áreas de vegetação natural, existem algumas restrições e dificuldades que

diferenciam o combate aos incêndios nessas áreas e nas plantações florestais. Uma restrição fundamental é que não se deve, ao combater um incêndio em vegetação natural, provocar mais distúrbios ou danos ao ecossistema do que o próprio fogo.

A detecção do fogo é o primeiro problema, pois, geralmente, as áreas de vegetação natural não contam com uma rede de torres de observação como as existentes na maioria dos reflorestamentos, a não ser as áreas de preservação permanente de algumas empresas florestais. Por isso, nesse caso, é importante contar com a detecção feita pelo público, o que depende muito da conscientização das pessoas para o problema do fogo, que pode ser melhorada através das campanhas de prevenção de incêndios.

A mobilização e o deslocamento das equipes, geralmente, também não são tão rápidos como nas empresas florestais, pois, na maioria das vezes, as áreas de vegetação natural estão sob administração pública e não há equipes que possam ser rapidamente mobilizadas para o combate ao fogo. O acesso, geralmente, também é mais difícil por não existirem, nas áreas de vegetação natural, redes de aceiros ou estradas com a mesma densidade encontrada nos reflorestamentos.

Finalmente, o ataque ao fogo ou combate propriamente dito deve ser feito com o devido cuidado, usando-se equipamentos e produtos que não agridam o ambiente. O combate deve ser feito, preferencialmente, com equipes terrestres, usando ferramentas manuais, equipamentos de bombeamento de água, pura ou misturada com retardantes de curta duração e auxílio aéreo (helicópteros e aviões para lançamento de água), se disponíveis.

O ataque ao fogo deve ser feito através dos métodos direto ou paralelo. O método indireto, com uso de contrafogo, somente deve ser empregado em situações de grande risco ou incêndios de alta intensidade, o que não é frequente em vegetação natural. A utilização de equipamentos pesados, como tratores de lâminas, também deve ser evitado, pois eles produziram danos severos ao solo e à vegetação, muitas vezes maiores do que os causados pelo próprio fogo.

Atualmente, existem produtos que facilitam bastante o combate ao fogo, principalmente nos métodos direto e paralelo. Um deles é o espumante ou retardante de curta duração, que, misturado à água,

pode aumentar sua eficiência em até cinco vezes, dependendo do tipo de equipamento usado no lançamento. Esse produto é biodegradável, não causa danos ao ambiente e tem sido usado com sucesso em vários países, inclusive no Brasil. Outro produto novo é o extintor de explosão, que, além da redução de oxigênio na zona de combustão, devido ao deslocamento de ar, libera água misturada com um retardante de longa duração, monofosfato de amônia, que, por ser um fertilizante, também não causa danos ao ambiente. Esses dois produtos são extremamente úteis no combate aos incêndios em vegetação natural, principalmente no interior de florestas nativas, onde não se deve usar máquinas pesadas para derrubar árvores e fazer aceiros.

Os tipos de vegetação natural no Brasil, exceto as florestas com araucária, já quase extintas, raramente desenvolvem incêndios de copa, devido à baixa flamabilidade da folhagem. Por esse motivo, os incêndios de vegetação natural, geralmente, são de superfície e de baixa a média intensidade. O incêndio de Roraima, ocorrido em 1998, apesar de ter queimado uma área de cerca de 1,5 milhões de hectares, foi um incêndio típico de vegetação natural com intensidade variando de baixa a média. A razão de ele ter atingido área tão grande foi o total despreparo do poder público para combater o fogo. Os responsáveis pelo combate desconheciam, inclusive, os recursos existentes no país, em termos de equipamentos e produtos, que poderiam ter sido facilmente deslocados para a região e usados para suprimir o fogo. Havia, sim, recursos humanos em abundância, mas não se pode combater um incêndio somente com as mãos.

Referências bibliográficas

- BURGAN, R. E.; HARTFORD, R. A. e EIDENSHINK, J. C. (1996). Using NDVI to assess departure from average greenness and its relation to fire business. *USDA Forest Service, General Technical Report INT-GTR-333*.
- CALABRI, G. (1991). Problems and prospects for forest fire prevention and control. X CONGRESSO FLORESTAL MUNDIAL. Paris, FAO. *Anais*.
- CANADIAN FORESTRY SERVICE (1970). *Canadian Forest fire weather index*. Ottawa, CFS.

- DEEMING, J. E.; LANCASTER, J. W.; FOSBERG, M. A.; FURMAN, R. W. e SCHROEDER, M. J. (1972). *National fire-danger rating system*. USDA Forest Service, Research Paper RM-84.
- FOLKMAN, W. S. (1973). *Fire prevention in Butte, California: evaluation of an experimental program*. Usda Forest Service, Research Paper PSW-98.
- LEMOS, J. M. e GAMA, M. P. (1978). Estudo comparativo de índices de periculosidade de incêndios no Distrito Federal – Brasília. III CONGRESSO FLORESTAL BRASILEIRO. São Paulo, Sociedade Brasileira de Silvicultura. *Anais*.
- McARTHUR, A. G. (1966). *Weather and grassland fire behaviour*. Canberra, Australia, Dept. of Natural Development, Forestry and Timber Bureau, Leaflet, n. 100.
- SAMPAIO, O. B. (1999). *Análise da eficiência de quatro índices na previsão de incêndios florestais para a região de Agudos, SP*. Tese de doutorado. Curitiba, Universidade Federal do Paraná.
- SOARES, R. V. (1972). *Determinação de um índice de perigo de incêndio para a região centro-paranaense, Brasil*. Dissertação de mestrado. Turrialba, Costa Rica, Catie/Iica.
- ____ (1985). *Incêndios florestais – controle e uso do fogo*. Curitiba, Fupef.
- ____ (1989). *Forest fire statistics for brazilian protected lands: 1983-1987*. III INTERNATIONAL SYMPOSIUM ON FIRE ECOLOGY. Freiburg, Alemanha, Universidade de Freiburg.
- ____ (1998). Desempenho da “Fórmula de Monte Alegre” – índice brasileiro de perigo de incêndios. *Cerne*, Lavras, v. 4, n. 1, pp. 87-99.
- ____ (1998a). *Comparação entre o índice de perigo de incêndio da Rigesa e a “Fórmula de Monte Alegre”*. Curitiba (relatório técnico).
- VELEZ, R. (1991). Uso del fuego en selvicultura. X CONGRESSO FLORESTAL MUNDIAL. Paris, FAO. *Anais*.

Antonio Celso de Oliveira Braga

A geofísica aplicada na caracterização da geologia e da qualidade das águas subterrâneas

Nas investigações *in situ* dos materiais geológicos em subsuperfície, aplicadas em estudos ambientais, a utilização dos métodos geofísicos têm se revelado de fundamental importância. Esses métodos apresentam, como vantagens principais, as características de permitirem um recobrimento de extensas áreas, de maneira rápida, precisão satisfatória, custos relativamente reduzidos e efetuarem investigações rasas até profundas, a partir da superfície do terreno, sem alterar as condições e estados naturais dos materiais em subsuperfície.

A geofísica tem apresentado um significativo avanço científico nessas questões ambientais, sendo cada vez maior sua utilização por pesquisadores e profissionais liberais. Essa ciência vem sendo utilizada procurando auxiliar a locação adequada de poços de monitoramento, avaliando a extensão e monitorando o avanço de plumas de contaminação. Mais especificamente, pode ser empregada na identificação e caracterização geológico-geotécnica de diferentes materiais em subsuperfície, determinação da profundidade do nível d'água, traçado de mapas potenciométricos (com as direções preferenciais de fluxo subterrâneo) mapas de plumas de contaminação (a várias profundidades) e delimitação da cunha salina em aquíferos costeiros.

Entretanto, a despeito dos bons resultados obtidos com a utilização da geofísica, como em qualquer outra técnica de prospecção direta ou indireta, deve-se observar certas condições básicas sobre a metodologia geofísica a ser utilizada, considerando-se, principalmente, as condições da área de estudo (geologia e operacionalidade de campo), definindo a(s) metodologia(s) mais correta(s).

Para estudos ambientais, considerando as condições locais da área a ser estudada, os métodos geofísicos recomendados, tradicionais e mais eficazes são os da eletrorresistividade, polarização induzida, eletromagnético e potencial espontâneo, pertencentes ao grupo dos métodos geoeletricos. As técnicas de campo ideais para o desenvolvimento dos métodos citados devem ser utilizadas considerando, simultaneamente, as análises qualitativas (caminhamento elétrico IP-resistividade, eletromagnético ou potencial espontâneo) e quantitativas (sondagem elétrica vertical IP-resistividade). A técnica recente do Ground Penetration Radar – GPR (método eletromagnético) vem sendo utilizada com sucesso, e caracteriza-se por ser um caminhamento cujos resultados são analisados qualitativamente e quantitativamente. Ressalta-se que, em função de novos *softwares* disponíveis no mercado para computadores, a técnica do caminhamento IP-resistividade (arranjo dipolo-dipolo) pode ser quantificada, apresentando seções geoeletricas verdadeiras.

O ciclo hidrológico e as águas subterrâneas

A água existente na natureza faz parte de um sistema circulatório conhecido como ciclo hidrológico. A partir de uma das fases desse ciclo, a *precipitação*, a água: (1) retorna à atmosfera através da evaporação das superfícies da água e do solo ou transpiração das plantas (evapotranspiração), (2) regressa aos oceanos sob as formas de escoamento superficial ou *run-off* (sobre a superfície do solo) e escoamento subsuperficial (através do solo), e (3) penetra profundamente no subsolo até os aquíferos: é denominada *infiltração*.

As fases precipitação, evapotranspiração e escoamento superficial envolvem a hidrologia de superfície, e a infiltração, a hidrologia de subsuperfície – hidrogeologia.

A hidrogeologia pode ser definida como o estudo da origem, distribuição, escoamento e avaliação dos recursos hídricos subterrâneos. Essa ciência envolve o estudo das recargas, reservas totais, volumes exploráveis e suas condições de exploração e a proteção das águas subterrâneas. Seus principais campos de atuação podem ser descritos:

- na captação de água subterrânea para abastecimento público, doméstico, industrial, agricultura, lazer, etc.;
- em estudos ambientais, na proteção do lençol freático, na implantação e monitoramento de aterros, vazamentos de poluentes, etc.;
- como “empecilho” na execução de obras civis e mineiras, sistemas de culturas agrícolas, instalação de equipamentos públicos e privados, etc.

A superfície externa da litosfera pode ser dividida, esquematicamente, em duas partes principais: zona não saturada e zona saturada. A zona não saturada pode ser subdividida em: (1) zona de evapotranspiração, onde se tem a umidade retida pelas plantas e a evaporação, (2) zona de retenção, onde se tem muito pouca água, e (3) zona capilar, com a umidade próxima da saturação. Água subterrânea é a massa da água da subsuperfície contida na zona saturada. O limite de separação entre essas duas zonas principais é conhecida como nível d'água subterrânea ou *nível freático (NA)*. Na hidrogeologia, o que mais interessa é a água subterrânea da zona saturada.

As técnicas de investigação das águas subterrâneas podem ter duas formas principais: (1) direta: observações efetuadas em campo (perfurações de sondagens e poços), instrumentos de ensaios e análises *in situ* e em laboratórios, e (2) indireta: utilização da geofísica, geoquímica e sensoriamento remoto.

Os principais tipos de aquífero, em função do material que os compõem e da forma como a água é armazenada, são os seguintes:

- Granulares: compostos por materiais granulares (sedimento, solo, etc.), em que a água ocorre ocupando os espaços intergranulares (rochas sedimentares).
- Fissurados: compostos por rochas duras, compactas (tipo “granito”), em que a água ocorre ocupando fissuras, fendas ou fraturas dessa rocha (rochas cristalinas).
- Cársticos: compostos por rochas duras ou por materiais granulares, em que a água ocorre ocupando os espaços vazios formados pela dissolução do material original (rochas calcárias).

A definição desses tipos de aquífero torna-se importante e fundamental para a adequada utilização da metodologia geofísica. Nos aquíferos tipo granulares, a técnica recomendada é a sondagem elétrica vertical, enquanto que nos aquíferos fissurados e cársticos a técnica ideal é a do caminhamento elétrico. As justificativas serão abordadas mais adiante.

Geofísica aplicada

A geofísica é uma ciência que se ocupa do estudo das partes rasas e profundas da Terra, medindo suas propriedades físicas e identificando corpos e/ou estruturas geológicas a partir da superfície do terreno, interior de furos de sondagem e levantamentos aéreos, com equipamentos sofisticados e apropriados. Essa ciência apresenta uma íntima relação com a física e a geologia, procurando resolver, a partir da física, problemas colocados em termos geológicos. Tanto o geofísico como o geólogo estudam a parte sólida da Terra; apesar de utilizarem instrumentos de trabalho diferentes, seus objetivos convergem em uma mesma direção.

Quanto à sua atuação, a geofísica pode ser dividida em básica e aplicada. Enquanto que na primeira o estudo das propriedades físicas da Terra e da sua constituição interna se dá a grandes profundidades ou em outras questões relacionadas a fenômenos de proporções globais, limitando sua área na atuação acadêmica, a segunda se preocupa com os estudos associados a situações ou estruturas geológicas relativamente rasas, procurando atender as necessidades da geologia aplicada (geologia de engenharia, prospecção mineral, geologia de petróleo, geologia ambiental, hidrogeologia, etc.)

Os principais fenômenos físicos que ocorrem no interior da Terra, nos quais a geofísica aplicada se baseia, estão ligados a: campo magnético terrestre, fluxo geotérmico, propagação de ondas sísmicas, força da gravidade, campos elétricos e eletromagnéticos, correntes telúricas e radioatividade.

Principais métodos geofísicos

Em função do parâmetro físico estudado, a geofísica aplicada pode ser dividida em cinco grupos principais, que podem ser denominados métodos maiores: gravimétrico, magnetométrico, geoeletrico, sísmico e geotérmico.

Dentre esses métodos, o mais importante e utilizado em estudos ambientais é o grupo dos métodos geoeletricos, mais especificamente os métodos da eletrorresistividade, polarização induzida e eletromagnético. Podemos destacar também a utilização, mais recente em nosso país, do método do potencial espontâneo e eletromagnético através da técnica do Ground Penetration Radar – GPR. A técnica do GPR, apesar de estar apresentando bons resultados, ainda é relativamente nova e requer maiores estudos e “cuidados” no seu emprego.

Uma questão importante quando se discutem não só os métodos geoeletricos, mas a geofísica como um todo, diz respeito à identificação de suas várias modalidades existentes. Uma classificação dos métodos geoeletricos proposta por Braga (1997) é baseada apenas em três critérios: método geofísico, técnica de desenvolvimento e arranjo de campo. Esses critérios, na prática, revelam-se de fácil entendimento e utilização, tornando claro o tipo de levantamento geofísico empregado, e podem ser definidos da seguinte maneira:

- Método: é definido em função do parâmetro físico medido (ex.: resistividade, cargabilidade, potencial natural, etc.);
- Técnica: é definida pelo tipo de investigação – horizontal e/ou vertical (ex.: sondagens, caminhamentos e perfilagens);
- Arranjo: caracteriza-se pela forma de disposição dos eletrodos no desenvolvimento da técnica (ex.: Schlumberger, Wenner, dipolo-dipolo, gradiente, etc.)

Mecanismos de propagação da corrente elétrica

Nas rochas, os mecanismos de propagação da corrente elétrica são caracterizados por suas condutividades (σ). Esses mecanismos podem ser do tipo condutividade eletrônica (metais e semicondutores) e condutividade iônica (eletrólitos sólidos – dielétricos – e eletró-

litos líquidos). A condutividade eletrônica é caracterizada pelo transporte de elétrons na matriz da rocha, sendo a sua resistividade governada pelo modo de agregação dos minerais e o grau de impurezas. A condutividade iônica deve-se ao deslocamento dos íons existentes nas águas contidas nos poros de uma massa de solo, sedimentos inconsolidados ou fissuras das rochas.

Como, praticamente, todas as rochas possuem poros em proporção maior ou menor, os quais podem estar ocupados, total ou parcialmente, por eletrólitos, em conjunto elas se comportam como condutores iônicos, de resistividades muito variáveis. Uma rocha condutora de corrente elétrica pode ser considerada como um agregado com estrutura de minerais sólidos, líquidos e gases, cuja resistividade é influenciada pelos seguintes fatores, segundo Iakubovskii e Liajov (1980):

- 1) resistividade dos minerais que formam a parte sólida da rocha;
- 2) resistividade dos líquidos e gases que preenchem seus poros;
- 3) umidade da rocha;
- 4) porosidade da rocha;
- 5) textura da rocha e a forma e distribuição de seus poros;
- 6) processos que ocorrem no contato dos líquidos contidos nos poros e a estrutura mineral, tais como: processo de adsorção de íons na superfície do esqueleto mineral, diminuindo a resistividade total dessas rochas.

Pode-se, portanto, considerar que a resistividade assume uma grande importância, pois o conteúdo em água e a litologia dos materiais representam fatores fundamentais no entendimento das questões relacionadas aos estudos sobre indicadores ambientais na prevenção, conservação e recuperação de áreas degradadas.

Métodos da eletrorresistividade e polarização induzida

Em 1827, Georg Ohm definiu uma relação empírica entre a corrente fluindo através de um condutor e o potencial de voltagem requerido para conduzir essa corrente. Ohm concluiu que a corrente (I) era proporcional à voltagem (V) para uma grande classe de mate-

riais (materiais *ohmicos*). A constante de proporcionalidade é chamada de **resistência** ($R = V/I$) do material e tem como unidades voltagem (volts) sobre corrente (ampères) ou *ohms* (Ω).

- como é a relação entre a resistência medida com algumas propriedades fundamentais do material do qual o condutor é feito?
- como podemos aplicar esse experimento, relativamente simples, para determinar as propriedades elétricas dos materiais da terra?

A resistência elétrica dos materiais como uma *medida* não depende só do material do qual o condutor é feito, mas também da sua geometria. O que interessa, entretanto, é definir uma propriedade que descreva a habilidade dos materiais em transmitir corrente elétrica independentemente dos fatores geométricos. A “quantidade” geometricamente-independente que é usada é a resistividade, sendo indicada por ρ .

Considerando um condutor qualquer de comprimento L , área de seção transversal A e resistência elétrica R , sua resistividade (ρ) pode ser definida como: $\rho = R.A/L$ (ohm.m). A resistividade é um parâmetro fundamental sobre a “fabricação” do condutor, é uma propriedade que descreve a habilidade dos materiais em transmitir corrente elétrica independentemente dos fatores geométricos. Altos valores de resistividade implicam que o material de fabricação do condutor é muito resistente ao fluxo da eletricidade. Baixos valores implicam que o material transmite corrente facilmente.

O uso desse parâmetro físico no campo baseia-se na capacidade do equipamento em introduzir uma corrente elétrica no subsolo a diferentes profundidades de investigação, as quais são governadas pelos espaçamentos dos eletrodos de emissão de corrente, e em calcular as resistividades dos materiais geológicos em subsuperfície. Em geral, os arranjos de campo do método da eletrorresistividade constam de quatro eletrodos cravados na superfície do terreno, conforme esquema da Figura 1.

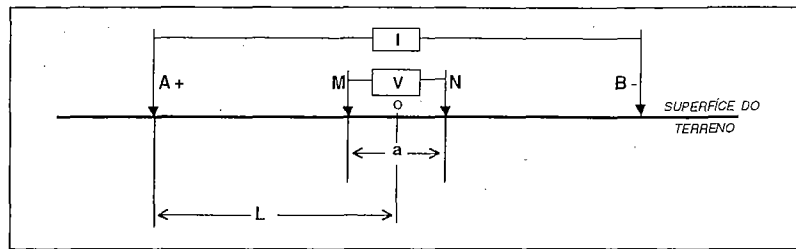


Figura 1 – Esquema do método da eletrorresistividade no campo

A corrente elétrica de intensidade I , introduzida no subsolo por meio dos eletrodos corrente (**A** e **B**) gera um potencial ΔV , o qual é medido por meio dos eletrodos de potencial (**M** e **N**). Ressalta-se que, como o subsolo é um meio heterogêneo, a quantia medida representa uma média ponderada de todas as resistividades verdadeiras em um volume de material em subsuperfície relativamente grande, portanto, ao efetuar as medições pertinentes obtém-se uma *resistividade aparente* (ρ_a), a qual pode ser calculada, a partir da equação:

$$\rho_a = K \cdot \frac{\Delta V}{I} \quad \text{onde,} \quad K = 2\pi \left(\frac{1}{AM} - \frac{1}{BM} - \frac{1}{AN} + \frac{1}{BN} \right) \quad (1)$$

Essa ρ_a é a variável que expressa os resultados das medições na maioria dos métodos geoeletricos, e é a que se toma como base para a interpretação final. As dimensões da resistividade aparente, em virtude de sua definição, são as mesmas que para a resistividade, e sua unidade será também ohm.m.

Enquanto a resistividade é calculada em função de um potencial gerado durante a emissão de uma corrente elétrica no subsolo, o método da polarização induzida (IP) baseia-se nas medições das variações de voltagem em função do tempo (domínio do tempo) ou frequência (domínio da frequência) durante o corte dessa corrente elétrica.

No IP-domínio do tempo (Figura 2), ao se aplicar corrente elétrica no solo, cria-se uma diferença de potencial ΔV primária; conseqüentemente, é provocada uma polarização do mesmo. A diferença de potencial primária (ΔV_p) não se estabelece e nem se anula instan-

taneamente quando a corrente é emitida e cortada em pulsos sucessivos. Varia com o tempo, na forma de uma curva $\Delta V_{IP} = f(t)$. Essa curva liga a assíntota ΔV_p em regime estacionário com a assíntota zero após o corte da corrente.

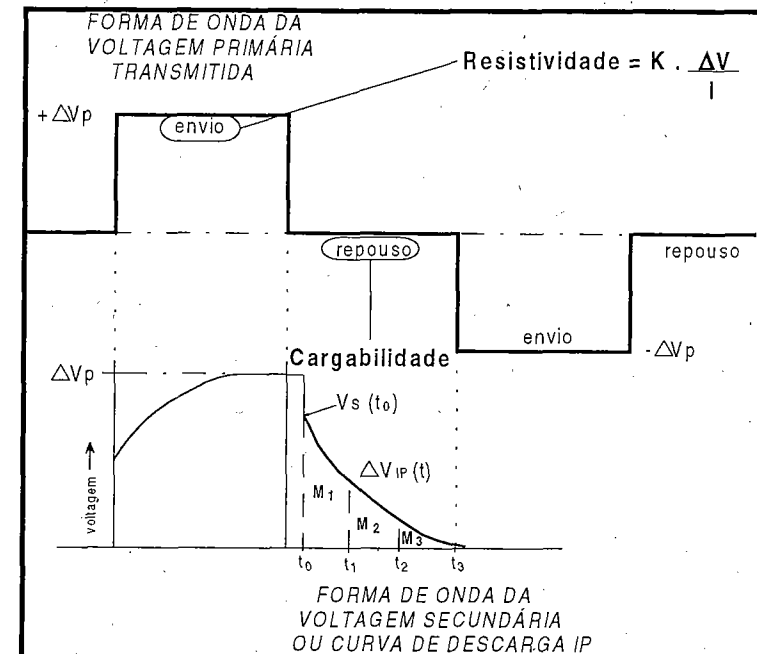


Figura 2 – Princípios de medida dos métodos da eletrorresistividade e polarização induzida

A amplitude de um valor $\Delta V_{IP}(t)$ está diretamente ligada à maior ou menor capacidade que os terrenos têm de se polarizar, constituindo-se, portanto, na base do método. Essa capacidade de polarização constitui a susceptibilidade IP dos materiais da terra.

Analogamente, pode-se descrever o fenômeno da polarização induzida, como se o solo contivesse pequenos *condensadores*, que se carregariam durante a emissão de corrente, descarregando-se após o corte. A curva $\Delta V_{IP} = f(t)$ poderia ser chamada, então, de curva de descarga IP. No IP-domínio do tempo, a curva de descarga é o objeto de estudo. Ela pode ser analisada em sua totalidade ou amostrada em

intervalos de tempo. O parâmetro medido em IP (tempo) é chamado de *cargabilidade* (M) e pode ser expresso em mili Volt/Volt (mV/V), milissegundos (ms) ou ainda em porcentagem ($\%$), dependendo das características técnicas do equipamento utilizado.

Como ocorre no método da eletrorresistividade, se as medidas da polarização induzida são efetuadas sobre um terreno cujo subsolo é heterogêneo, resulta que os dados de campo expressam polarizações aparentes. No IP-domínio do tempo, o parâmetro resultante das medidas é denominado *cargabilidade aparente* (Ma).

Técnicas da sondagem elétrica vertical e caminhamento elétrico

As técnicas de ensaios geofísicos dos métodos geoeletricos podem ser de três tipos principais: sondagens, caminhamentos e perfilações. A diferença básica entre essas técnicas está no procedimento de campo para se obter o parâmetro físico a ser estudado, ou seja, na disposição dos eletrodos na superfície do terreno ou no interior de furos de sondagens e na maneira de desenvolvimento dos trabalhos para se obter os dados de campo, ligada aos objetivos da pesquisa. Definições mais detalhadas dessas técnicas de campo podem ser encontradas em Braga (1997).

A técnica da sondagem elétrica vertical (SEV) consiste, basicamente, na análise e interpretação dos parâmetros físicos: *resistividade aparente* (método da eletrorresistividade) e *cargabilidade aparente* (método da polarização induzida – domínio do tempo), obtidos a partir de medidas efetuadas na superfície do terreno, investigando, de maneira *pontual*, suas variações em profundidade. Essa técnica permite identificar e caracterizar, quantitativamente, os diferentes tipos de materiais geológicos em subsuperfície, seus graus de saturação, determinar seus estados em termos de alteração e/ou fraturamento, e determinar com satisfatória precisão a profundidade do lençol freático.

No desenvolvimento da SEV, o arranjo de campo mais utilizado e preciso é o Schlumberger (Figura 3). Nesse arranjo, a partir dos quatro eletrodos colocados na superfície do terreno, dispostos simetricamente em relação ao centro o e sobre uma mesma reta, têm-se

que, enquanto os eletrodos de recepção (MN) permanecem fixos, os eletrodos de emissão (AB) variam ao longo do arranjo, aumentando a profundidade de investigação. Para esse arranjo deve-se manter a relação: $MN \leq AB/5$ (Orellana, 1972).

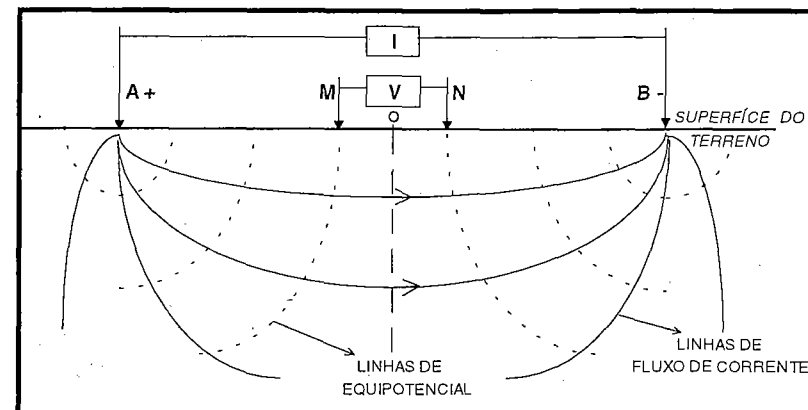


Figura 3 – Arranjo de campo Schlumberger – Técnica da SEV

O valor da resistividade aparente pode ser determinado a partir da equação (1) e o valor da *cargabilidade aparente* – domínio do tempo é obtido diretamente no equipamento geofísico, apropriado para o desenvolvimento dessa metodologia. A profundidade teórica de investigação pode ser tomada como $AB/4$.

Os dados obtidos no campo são plotados em gráficos bilogárfmicos para representação e posterior interpretação. Ressalta-se que, na interpretação de uma SEV, o modelo geoeletrico obtido não é resultante de um simples ajuste das curvas de campo com modelos teóricos, efetuados, principalmente, por meio de programas existentes para computadores, mas é necessário efetuar uma análise morfológica das curvas de campo, considerando sempre a geologia da área estudada.

A técnica do caminhamento elétrico (CE) se baseia na análise e interpretação dos parâmetros físicos *resistividade aparente* (método da eletrorresistividade) e *cargabilidade aparente* (método da polarização induzida – domínio do tempo) obtidos a partir de medidas efetuadas na superfície do terreno, investigando, ao longo de uma

seção, suas variações na *horizontal*, a uma ou mais profundidades determinadas.

No desenvolvimento dessa técnica, existem várias modalidades de arranjos de campo, entretanto, o mais comum e preciso é o dipolo-dipolo (Figura 4). Esse tipo de arranjo é o que apresenta melhores resultados nas investigações de indicadores ambientais e hidrogeológicas.

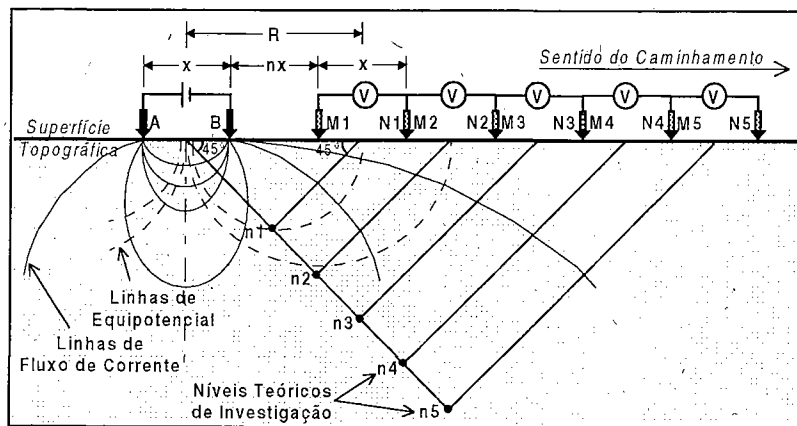


Figura 4 – Arranjo de campo dipolo-dipolo – Técnica do CE

No desenvolvimento desse arranjo, o centro dos dipolos AB e MN não permanecem fixos, o espaçamento entre os eletrodos A-B deve ser mantido igual ao M-N, o espaçamento entre os centros dos dipolos AB e MN (R) pode variar, utilizando-se, simultaneamente, vários dipolos MN dispostos ao longo da linha, os quais investigam diferentes profundidades.

A resistividade aparente pode ser calculada a partir da equação:

$$\rho_a = K \cdot \frac{\Delta V}{I}, \quad \text{onde: } K = 2\pi \cdot G \cdot x, \quad \text{com } G = \frac{1}{\frac{1}{n} + \frac{1}{n+1} + \frac{1}{n+2}}$$

sendo, **K** o fator geométrico que depende da disposição dos eletrodos ABMN na superfície do terreno, **x** o espaçamento dos dipolos AB e

MN adotado, e **n** o nível de investigação correspondente. A cargabilidade aparente (IP-domínio do tempo) é determinada diretamente no equipamento geofísico utilizado. A profundidade teórica de investigação pode ser tomada como $R/2$.

Os dados obtidos são plotados em seções e a interpretação é efetuada analisando-se as variações dos parâmetros físicos obtidos, considerando-se um sistema de plotagem de 45° graus e a posição dos dipolos. Os resultados se relacionam entre si através de seções (com várias profundidades de investigação – níveis de investigação) e/ou através de mapas (a uma ou mais profundidades determinadas).

Essa técnica é indicada na prospecção mineral, estudos aplicados à geologia de engenharia e hidrogeologia na determinação de corpos intrusivos, falhamentos e/ou fraturamentos, contatos geológicos, etc., ou seja, estruturas e/ou corpos que não apresentem um posicionamento paralelo à superfície do terreno. Nas questões ambientais, essa técnica tem apresentado excelentes resultados, principalmente na determinação das direções preferenciais de fluxo d'água subterrâneo e no mapeamento de plumas de contaminação, analisando o comportamento do poluente tanto em extensão lateral, como em vários níveis de profundidade.

Caracterização geolétrica da geologia

Na identificação e caracterização geolétrica dos materiais geológicos em subsuperfície, a técnica de campo indicada é a da sondagem elétrica vertical IP-resistividade. Na interpretação dos dados obtidos no campo, é fundamental a determinação da profundidade do nível d'água, separando os materiais em duas porções: seca e saturada, determinadas pela resistividade. Pode-se constatar, em vários trabalhos de campo, que o parâmetro cargabilidade não é adequado para determinar a profundidade do nível d'água.

Como já foi abordado, as resistividades das rochas dependem de inúmeros fatores e podem apresentar uma ampla gama de variação. Quando os solos e as rochas encontram-se secos, porção localizada acima do nível d'água, seus valores são considerados atípicos, apresentando uma ampla faixa de variação (por exemplo, 100 a 20.000 ohm.m), não permitindo a identificação litológica desses materiais. As variações das resistividades, nesse caso, refletem apenas as pe-

Tabela – Faixas de variação nos valores de resistividades de alguns tipos litológicos principais

TIPO LITOLÓGICO		CARGABILIDADE (mV/V)	Resistividade (ohm.m)	
Solo - Sedi- mentos predo- minan- tes	Zona não saturada	0,4 a 23,4	100 < \square < 30.000	
	Zona satura da	Argiloso	1,5 a 1,9	$\square \leq 20$
		Argilo-Arenoso		20 < \square < 40
		Areno-Argiloso	7,1 a 45,0	40 \leq \square < 60
		Siltito Argiloso		10 < \square < 60
		Siltito Arenoso		
Arenoso	0,1 a 5,8	$\square \geq 60$		
Rocha	Argilito	1,5 a 1,9	10 a 20	
	Arenito	0,1 a 5,8	100 a 300	
	Basalto/Diabásio	20,0 a 30,0	80 a 300	
	Calcário		500 a 1.000	
	Granito/Gnaiss	10,0 a 20,0	3.000 a 5.000	

quenas variações de saturação existentes nessa porção seca. Na porção saturada, a resistividade, aliada à cargabilidade, permite a identificação e caracterização dos diferentes tipos litológicos. Em função da experiência adquirida, a Tabela apresenta as margens de variações das resistividades e cargabilidades de solos e alguns tipos de rochas mais comuns.

Na caracterização geoeétrica dos parâmetros hidráulicos, tais como transmissividade e porosidade de um aquífero, os parâmetros de Dar Zarrouk (Henriet, 1975 e Braga et alii, 1999a) apresentam excelentes resultados.

Na multiplicação da resistividade (ρ) pela espessura (E) de uma camada geoeétrica obtém-se a resistência transversal unitária (T). Essa resistência transversal pode ser correlacionada com a transmissividade do aquífero, pois esse parâmetro hidrogeológico resulta da multiplicação da permeabilidade pela espessura da camada, e sabe-se que a resistividade é diretamente proporcional à permeabilidade. Portanto, mapas de T podem ser associados à transmissividade do aquífero estudado.

A porosidade de uma camada geológica pode ser estimada a partir do chamado *fator de formação* (Orellana, 1972), o qual é resultante da resistividade dessa camada dividida pela resistividade da água de impregnação.

Caracterização geoeétrica da qualidade das águas subterrâneas

Nos estudos sobre a qualidade das águas subterrâneas, além do emprego da técnica da SEV, deve-se utilizar o CE. Essa técnica permite, como já abordado, um mapeamento mais detalhado, de maneira qualitativa, das direções de fluxos d'água subterrâneas, de plumas de contaminação e de limites de áreas de disposição de resíduos.

Através dos vários níveis de investigação dessa técnica, arranjo dipolo-dipolo, é possível o traçado de mapas representativos de diferentes profundidades, os quais permitem uma perfeita visualização do comportamento dos contaminantes, tanto lateralmente, quanto em profundidade, servindo para avaliar o grau de extensão da contaminação nos solos e nas rochas.

A introdução de alguns tipos principais de contaminantes no subsolo, tais como os derivados de aterros (chorumes, etc.), vazamentos de combustíveis (gasolina, óleo, etc.), alteram significativamente os valores naturais das resistividades e cargabilidades dos materiais geológicos, tais como os apresentados na Tabela. Experiências de campo comprovam que os valores de resistividades podem diminuir até dez vezes o valor natural, enquanto que os valores de cargabilidade tendem a aumentar (Malagutti et alii, 1997).

Como um exemplo, podemos citar o trabalho de Braga et alii (1999b), no qual, através de ensaios geofísicos pelo método da eletroresistividade – técnicas de campo da SEV e CE, realizados em uma área de disposição de resíduos industriais, foi possível caracterizar a geologia local (SEV), determinar as direções preferenciais do fluxo d'água subterrâneo e delimitar lateralmente e em profundidade a pluma de contaminação (CE).

Segundo o autor, foram traçados três mapas de isovalores de resistividade aparente a partir do CE: (1) mapa do primeiro nível, (2) mapa do terceiro nível, e (3) mapa do quinto nível. Respectivamente, as profundidades teóricas investigadas foram de 10, 20 e 30 metros. A Figura 5 ilustra em 3D os resultados obtidos pelo CE. A faixa condutora (valores < 500 ohm.m), relacionada à porção com provável influência do resíduo industrial, tende a diminuir em profundidade, resultando em pequenas manchas localizadas (mapa do quinto nível). Ressalta-se que o mesmo ocorre com a faixa de valores < 100 ohm.m,

tida como solo com maior influência do resíduo. Isto evidencia que, em profundidade, o resíduo ocorre em locais restritos. Nesses mapas foram traçadas duas direções preferenciais do fluxo d'água subterrâneo, as quais estão relacionadas com os condutores associados à influência do resíduo industrial.

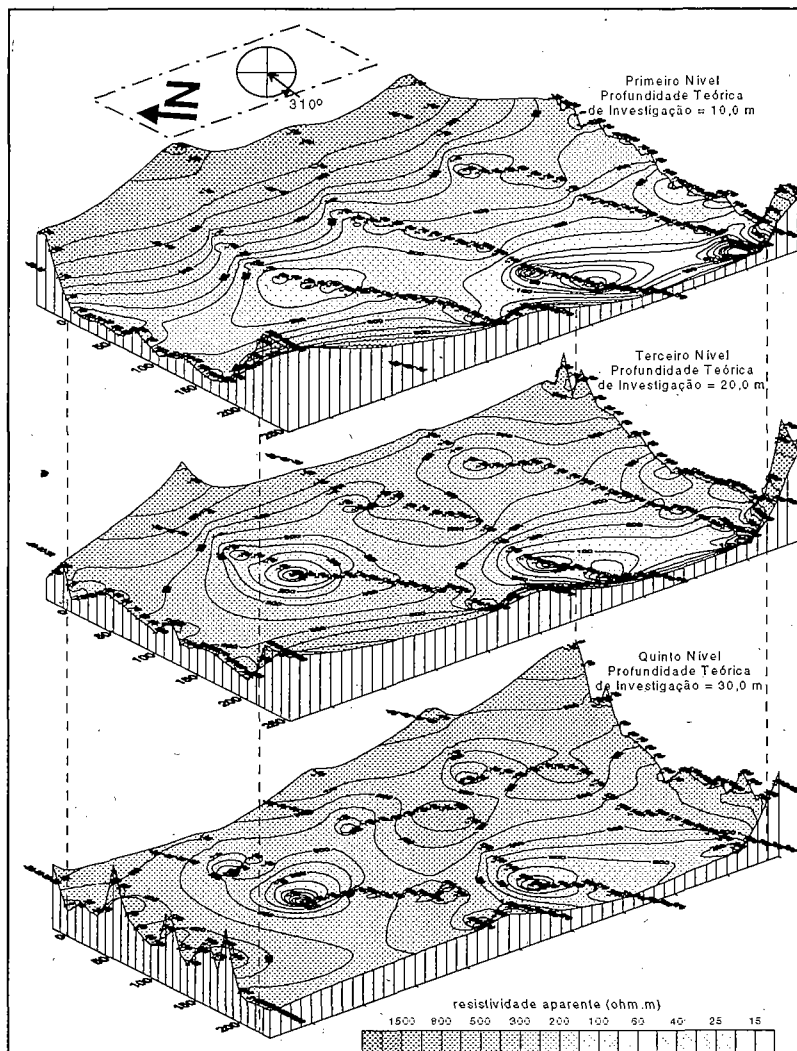


Figura 5 – Caso histórico - arranjo de campo dipolo-dipolo – técnica do CE (Braga et alii, 1999)

Conclusões

A geofísica aplicada, com seu crescente e rápido desenvolvimento, principalmente envolvendo questões relacionadas com os estudos ambientais, nas fases de prevenção, monitoramento e recuperação de áreas degradadas, tem apresentado resultados importantes no entendimento do comportamento geológico e geotécnico dos materiais em subsuperfície e nas questões diretamente ligadas à hidrogeologia, tais como profundidade do nível d'água, direções de fluxo do lençol subterrâneo, delimitação de plumas de contaminação e cunha salina de aquíferos costeiros.

Mesmo com esse sucesso, a metodologia geofísica deve ser empregada com muitos cuidados; os métodos e, principalmente, as técnicas de campo devem ser escolhidas levando em consideração a geologia da área e os objetivos requeridos em cada trabalho. Novas técnicas de campo, softwares para interpretação dos dados e maior oferta de empresas trabalhando no mercado tendem a tornar o emprego da geofísica aplicada cada vez maior, permitindo aos interessados maiores opções na qualidade e custos dos trabalhos geofísicos.

Referências bibliográficas

- BRAGA, A. C. O. (1997). *Métodos geoeletricos aplicados na caracterização geológica e geotécnica – Formações Rio Claro e Corumbataí, no município de Rio Claro – SP*. Tese de doutorado em Geociências. Rio Claro, Instituto de Geociências e Ciências Exatas, Universidade Estadual Paulista.
- BRAGA, A. C. O.; MALAGUTTI FILHO, W.; DOURADO, J. C. e ELIS, V. R. (1999a). Métodos geoeletricos aplicados no estudos do lençol freático em área de disposição de resíduos industriais. 6th INTERNATIONAL CONGRESS OF THE BRAZILIAN GEOPHYSICAL SOCIETY. Sociedade Brasileira de Geofísica – SBGf, Rio de Janeiro, 15 a 19 de agosto de 1990.
- BRAGA, A. C. O.; MALAGUTTI FILHO, W.; DOURADO, J. C. e CHANG, H. K. (1999b). Correlation of electrical resistivity and induced polarization data with geotechnical survey standard penetration test (SPT) measurements. *Journal of*

Environmental and Engineering Geophysics (JEEG) – The Environmental and Engineering Geophysical Society (EEGS), v. 4, n. 2, 1999, pp. 35-42.

DRASKOVITS, P.; HOBOT, J.; VERÖ, L. e SMITH, B. (1990). Induced-polarization surveys applied to evaluation of groundwater resources, Pannonian Basin, Hungary. USA. *Investigations in Geophysics*, n. 4. Induced Polarization Applications and Case Histories. Society of Exploration Geophysicists, Ed. Stanley H. Ward, pp. 379-396.

HENRIET, J. P. (1975). Direct applications of the Dar Zarrouk parameters in ground water surveys. *Geophysical Prospecting*, n. 24, pp. 344-353.

IAKUBOVSKII, I. U. V. e LIAJOV, L. L. (1980). *Exploración eléctrica*. Espanha, Editorial Reverté.

MALAGUTTI FILHO, W.; JOSÉ, C.; BRAGA, A. C. O.; ELIS, V. R.; TANDEL, R. Y. e PORSANI, J. L. (1997). Aplicação integrada de técnicas geofísicas no aterro sanitário de Rio Claro-SP – Resultados Preliminares. 5th INTERNATIONAL CONGRESS OF THE BRAZILIAN GEOPHYSICAL SOCIETY. Sociedade Brasileira de Geofísica – SBGf, São Paulo, 28 set./2 out., 1997, VI, pp. 422-425.

ORELLANA, E. (1972). *Prospección geoelectrica en corriente continua*. Madrid, Ed. Paraninfo, Biblioteca Tecnica Philips.