Universidade de São Paulo
Escola Superior de Agricultura "Luiz de Queiroz"

Aplicação da dendrogeomorfologia na caracterização e datação de processos erosivos em voçorocas na região de Piracicaba, SP

Virginia Domínguez Castillo

Dissertação apresentada para obtenção do título de Mestra em Ciências. Área de concentração: Solos e Nutrição de Plantas

Piracicaba
2016

Virginia Domínguez Castillo
Licenciada em Ciências Ambientais

Aplicação da dendrogeomorfologia na caracterização e datação de processos erosivos em voçorocas na região de Piracicaba, SP

versão revisada de acordo com a resolução CoPGr 6018 de 2011

Orientador:
Prof. Dr. **MIGUEL COOPER**

Dissertação apresentada para obtenção do título de Mestra em Ciências. Área de concentração: Solos e Nutrição de Plantas

Piracicaba
2016

Dados Internacionais de Catalogação na Publicação
DIVISÃO DE BIBLIOTECA - DIBD/ESALQ/USP

Domínguez Castillo, Virginia
Aplicação da dendrogeomorfologia na caracterização e datação de processos erosivos em voçorocas na região de Piracicaba, SP / Virginia Domínguez Castillo. - - versão revisada de acordo com a resolução CoPGr 6018 de 2011. - - Piracicaba, 2016.
135 p. : il.

Dissertação (Mestrado) - - Escola Superior de Agricultura "Luiz de Queiroz".

1. Mudanças anatômicas 2. *Pinus* 3. Clima tropical 3. Dendrogeomorfologia I. Título

CDD 631.45
D671a

"Permitida a cópia total ou parcial deste documento, desde que citada a fonte – O autor"

Dedico este trabajo a la Pachamama porque de ella es,
porque sólo a ella le pertenecen sus enigmas.

AGRADECIMENTOS

Agradeço primeiramente a minha magnífica família que apesar da distância sempre esteve presente em todos os lugares com o seu apoio, carinho e valores;

Ao Gonzalo, *mi pequeño compañero*, pela paciência e enorme apoio nos momentos mais difíceis. Obrigada por caminhar junto a mim nesta aventura;

Ao meu orientador Miguel Cooper por fazer possível esta oportunidade, boa acolhida e confiança, compressão, paciência e orientação;

Ao professor Mario Tomazello Filho pela ajuda, orientação e recebimento no laboratório de Anatomia, Identificação e Densitometria de Raios X em Madeira;

Á Renata pela honra de trabalhar em equipe junto com ela e porque esta dissertação tem duas mães;

Aos pós-graduandos do Departamento de Solos: Edison, Márcio, Renato, Manu, Sara, Ricardo, Camila, Lorena, Raquel, Laura, Kilma, Lucas, Leandro e Gabriel pela amizade, ajuda e grata companhia;

Aos estagiários Júlia, Cleo, Patrick, Vítor, Felipe, Marte, Katarina, Ingrid e Matheus;

Aos funcionários do Departamento de Solos e da Floresta: Rossi, Sónia, Chiquinho, Célia, Maria e Martinha pela ajuda e amabilidade. Especialmente, ao Aparecido e Dorival já que o trabalho de campo não teria sido possível sem eles;

Ao professor Fidel Alejandro Roig pelo conhecimento e todos os estudantes do departamento da floresta pela ajuda e especialmente ao Matheus, Tássio e Alejandro;

Ao professor Peterson, e o grupo TopoGEO, pela ajuda no levantamento topográfico;

À Fundação Coordenação de Aperfeiçoamento de Pessoal de Nível Superior (CAPES) pela bolsa concedida;

Ao Horto Florestal de Tupi, pela concessão da área de estudo e seus funcionários;

Aos meus amigos da Meseta alcarreña e aqueles que encontrei no Brasil (especialmente Cleucione, Marta, Marcela e Marina) e nos diferentes lugares do mundo que sempre me deram a sua amizade e apoio.

E finalmente, ao maravilhoso povo brasileiro.

"Las culturas indígenas la ven desde adentro.
Viéndola, me veo.
Lo que contra ella hago, está hecho contra mí.
En ella me encuentro,
mis piernas son también el camino que las anda.
(...) Y ojalá los sordos escuchen:
los derechos humanos y los derechos de la naturaleza
son dos nombres de la misma dignidad"

Eduardo Galeano

SUMÁRIO

RESUMO 11
ABSTRACT..... 13
1 INTRODUÇÃO.....15
2 REVISÃO BIBLIOGRAFICA 17
2.1 Erosão.....17
2.1.1 Mecânica do processo erosivo.....17
2.1.2 Tipos de erosão.....21
2.1.3 Impactos da erosão 23
2.2 Dendrocronologia 24
2.2.1 Anatomia do lenho das árvores 25
2.2.2 Dendrogeomofologia.....28
2.2.3 Influência dos processos geomorfológicos nas árvores. 30
2.2.3.1 Madeira de reação 30
2.2.3.2 Excentricidade.....31
2.2.3.3 Cicatrizes e canais tangenciais resiníferos (TRDs) 32
2.2.3.4 Anomalias em traqueídes, vasos condutores e largura nos anéis de crescimento. 33
2.2.4 Estudos dendrocronológicos com o gênero Pinus.....34
2.2.5 Densitometria mediante raios X no estudo dos anéis de crescimento..... 35
3 MATERIAL E MÉTODOS.....37
3.1 Caracterização da área de estudo.....37
3.1.1 Clima 37
3.1.2 Geologia 39
3.1.3 Geomorfologia.....40
3.1.4 Solos 42
3.1.5 Vegetação 43
3.2 Seleção das espécies e levantamento topográfico.....44
3.3 Identificação botânica e caracterização dos indivíduos..... 45
3.4 Metodologia de análise do caule e da raiz das árvores 47
3.4.1 Caule.....47
3.4.1.1 Coleta das amostras do caule.....47
3.4.1.2 Caracterização dos anéis de crescimento: dendrocronologia. 48
3.4.2 Raiz.....50

3.4.2.1 Coleta das amostras da raiz..... 50
3.4.2.2 Caracterização dos anéis de crescimento: dendrocronologia. 56
3.5 Determinação da densidade do lenho mediante raios X 58
3.6 Datação dos processos erosivos e cálculo da taxa de erosão 59
3.7 Determinação do crescimento excêntrico das raízes 60
4 RESULTADOS E DISCUSSÃO.....63
4.1 Caule 63
4.1.1 Caracterização dos aneis de crescimento do caule 63
4.1.2 Dendrocronologia e datação cruzada do caule 66
4.1.3 Dendroclimatologia: influência do clima local.....73
4.2 Raízes 76
4.2.1 Caracterização e datação dos anéis de crescimento das raízes..... 76
4.2.2 Excentricidade, densidade e correlação dos anéis das raízes enterradas..... 78
4.2.3 Datação do primeiro ano da exposição da raiz e análise dendrogeomorfológica..... 80
4.3 Dinâmica dos processos erosivos na área de estudo..... 92
4.4 Análise da taxa de erosão 104
5 CONCLUSÕES..... 111
REFERÊNCIAS..... .113
ANEXOS …….. 129

RESUMO

Aplicação da dendrogeomorfologia na caracterização e datação de processos erosivos em voçorocas na região de Piracicaba, SP

O solo é um recurso natural essencial para os seres humanos. Porém, atualmente, as atividades humanas estão provocando a degradação do solo principalmente através da aceleração dos processos erosivos. Os estudos sobre estes processos ajudam na compreensão, interpretação e conservação do solo. Assim, este trabalho pretende estudar e datar os processos erosivos em uma voçoroca localizada na Estação Experimental de Tupi (Piracicaba SP) mediante o uso da dendrogeomorfologia. A dendrogeomorfologia é uma ciência relativamente recente que relaciona os anéis de crescimento das árvores com processos geomorfológicos permitindo a reconstrução cronológica e ocorrência dos eventos. A relevância deste estudo é conhecer o potencial desta ciência em áreas tropicais já que atualmente este tipo de estudos são escassos nestas áreas. Esta técnica foi aplicada utilizando raízes expostas de espécies do gênero *Pinus sp.* A datação do processo erosivo baseou-se nas mudanças no padrão de crescimento das raízes, tais como: a largura do anel, crescimento excêntrico, porcentagem do lenho tardio e densidade do lenho ocorridas após a sua exposição pelo processo erosivo. Através do estudo destas alterações determinou-se o primeiro ano de exposição da raiz e se calculou a taxa de erosão anual. Os resultados mostraram que a voçoroca está formada pela integração de dois sistemas de diferentes origens que confluem em um degrau de erosão. A abertura das voçorocas está influenciada pela presença de processos de "*piping*" na área, os quais também afetam a morfologia das raízes quando enterradas. A taxa de erosão vertical, segundo o método de GÄRTNER (2007), atingem valores entre 17,0 e 36,5 mm/ano quantificando o processo de afundamento da voçoroca; e a taxa de erosão horizontal, segundo o método de MALIK (2008), valores de 0,70 e 1,45 m/ano caracterizando o avanço longitudinal da mesma. Estes resultados são elevados se comparados com resultados obtidos em climas temperados por outros autores e similares aos publicados por BOVI (2013) na mesma área de estudo. Finalmente, a dendrogeomorfologia se corrobora como uma ferramenta de grande potencial em áreas tropicais. Os dados e informações obtidos podem se traduzir num banco de dados dendrogeomorfológicos e contribuir à expansão desta ciência no Brasil e áreas de ambientes tropicais.

Palavras-chave: Mudanças anatômicas; *Pinus*; Clima tropical; Dendrogeomorfologia

ABSTRACT

Application of dendrogeomorphology in characterization and dating of erosion process in gullies in the region of Piracicaba, SP

Soil is a vital natural resource for humans. However today, human activities are causing soil degradation mainly by accelerating soil erosion. Studies of these processes help to understand, interpret and conserve the soil. This work aims to study and date the erosion in a gully located in the Experimental Station of Tupi (Piracicaba SP) using dendrogeomorphology. Dendrogeomorphology is a relatively new science that relates the growth tree rings with geomorphological processes allowing chronological reconstruction and occurrence of events. The relevance of this study is to know the potential of this science in tropical areas because currently this type of studies are lacking in these areas. This technique was applied using exposed roots of species of *Pinus sp*. The dating of the erosion process was based on the changes in the pattern of root growth, such as the width of the ring, eccentric growth, percentage of latewood and density of the wood that occur after exposure by erosion. Through the study of these changes the first year of root exposure was determined, and the annual rate of erosion was estimated. The results showed the gully is formed by the integration of two different systems that converge in an erosion step. The opening of the gully is influenced by the presence of piping in the area, which also affect the morphology of the roots when buried. The vertical erosion rate, according to the method of GÄRTNER (2007), reached values between 17.0 and 36.5 mm/year quantifying the deepenning process of the gully; and horizontal erosion rate according to the method of MALIK (2008), values of 0.70 and 1.45 m/year characterizing the longitudinal advancement of the gully. These results were high compared with results obtained in temperate climates by others authors, and similar to those published by BOVI (2013) in the same site. Finally, dendrogeomorphology demonstrates great potential as a tool in tropical areas. The data and information obtained can be translated into a dendrogeomorphological database and contribute to the expansion of this science in Brazil and areas of tropical environments.

Keywords: Anatomy changes; *Pinus*; Tropical climate; Dendrogeomorphology

1 INTRODUÇÃO

O solo é o suporte essencial para a vida. É um meio muito complexo, já que a sua composição é produto da interação prolongada entre vários sistemas (biosfera, litosfera, atmosfera e hidrosfera). O solo é considerado como um dos recursos naturais mais importantes do planeta e um dos mais utilizados pelo ser humano. Os seres humanos obtêm 99,7% dos alimentos utilizando o solo como substrato e menos de 0,3% dos oceanos e outros ecossistemas aquáticos (PIMENTEL, 2006). O processo de formação do solo envolve muito tempo por isso é considerado um recurso não renovável, portanto, deve ser gerido de forma adequada para evitar a sua degradação (LAL, 2009).

A erosão é um fenômeno complexo que provoca perdas de solo em vastas regiões do planeta terra, sendo considerada um dos maiores problemas de degradação do solo e do meio ambiente (AIELLO; ADAMO; CANORA, 2015). O conhecimento dos custos econômicos dos efeitos da erosão é importante para a sociedade, já que permite implementar políticas para a conservação do solo e fomentar o desenvolvimento sustentável (TELLES; GUIMARÃES; DECHEN, 2011). A erosão do solo além de ser um problema ambiental é também um problema importante de segurança alimentar para a sociedade (PIMENTEL, 2006).

Devido à complexidade do solo e dos processos erosivos, o estudo detalhado destes processos requer o uso de técnicas complementares utilizadas em outras áreas da ciência. Além dos métodos tradicionais para a determinação da erosão do solo, recentemente apareceu um método inovador, baseado na ciência da dendrocronologia, denominada dendrogeomorfologia. A dendrogeomorfologia permite através da datação e análise dos anéis de crescimento das raízes ou do caule das arvores identificar processos geomorfológicos como a erosão do solo (CHARTIER; ROSTAGNO; ROIG, 2009). As mudanças no padrão de crescimento dos anéis das raízes expostas, tais como perdas de concentricidade, formação de cicatrizes ou alterações anatômicas permitem determinar o primeiro ano de exposição da raiz e datar os eventos (HITZ et al., 2008a).

A grande relevância deste estudo é descobrir o potencial da ciência da dendrogeomorfologia em áreas tropicais. Atualmente este tipo de estudos são escassos nestas áreas havendo somente dois estudos prévios MOMOLI et al. (2012) e BOVI (2013). Nas áreas de clima tropical, além dos métodos tradicionais, é importante introduzir e pesquisar novas técnicas para o estudo e controle da erosão já que são zonas onde se manifestam fortes processos erosivos. A abordagem desta ciência é muito prática para o estudo da erosão, gestão da terra sobre a erosão e conservação do solo e para o estabelecimento de registros em regiões onde

não existe ou é escassa esta informação ou o seu monitoramento (CHARTIER et al., 2016). Os estudos realizados poderão se traduzir num banco de dados dendrogeomorfológicos e contribuir à expansão desta ciência tanto no Brasil quanto nas áreas de climas tropicais.

O presente trabalho parte das seguintes hipóteses:

I. A dendrogeomorfologia é uma ferramenta eficiente para datar, quantificar e compreender processos erosivos em áreas de climas tropicais.
II. Os processos erosivos em voçorocas provocam a exposição e mudanças anatômicas nas raízes dos pinheiros.
III. O uso de espécies do gênero *Pinus* é adequado na datação de processos erosivos em áreas tropicais.
IV. A erosão afeta negativamente ao crescimento das árvores.

Diante da carência de estudos no campo da dendrogeomorfologia em áreas de clima tropical e no Brasil, este trabalho pretende explorar esta ferramenta para compreender a dinâmica do processo erosivo e determinar as taxas de erosão em voçorocas utilizando-se espécies do gênero *Pinus*. Os objetivos específicos são:

I. Analisar as mudanças anatômicas que os processos erosivos provocam no lenho das árvores.
II. Identificar o primeiro ano de exposição das raízes mediante a análise de mudanças anatômicas nos anéis de crescimento.
III. Quantificar a velocidade e intensidade dos processos erosivos através das alterações produzidas no lenho das espécies arbóreas.
IV. Explicar e entender a dinâmica dos processos erosivos da área.

2 REVISÃO BIBLIOGRAFICA

2.1 Erosão

A degradação do solo afeta tanto as terras agrícolas como as áreas com vegetação natural e pode ser considerado, dessa forma, um dos mais importantes problemas ambientais na atualidade. As principais causas de degradação do solo são a erosão, a perda de matéria orgânica, a contaminação do solo, o selamento e compactação do solo, a perda de biodiversidade, a salinização e os deslizamentos de terra (HUBER et al., 2008).

Um importante processo de degradação do solo é a erosão que pode ser definida como o desgaste da superfície terrestre mediante forças físicas provocadas pela água, vento, gelo, mudanças de temperatura, gravidade, ou outro agente natural ou antrópico que desgasta, desprende e remove solo ou o material de origem de um ponto da superfície terrestre para ser depositado em outro lugar (HUBER et al., 2008).

Existem dois tipos de erosão: erosão geológica e erosão acelerada. A primeira está caracterizada por ser um processo natural de desgaste que geralmente ocorre com uma velocidade baixa em todos os tipos de solos formando parte, inclusive, do processo natural de formação do solo. Isto acontece numa escala geológica e não é influenciado pela atividade humana. Por outro lado, a erosão torna-se problema quando a taxa de erosão excede as taxas de formação do solo sendo denominada erosão acelerada (HUMBERTO, 2008; LEPSCH, 2011).

2.1.1 Mecânica do processo erosivo

Atualmente a erosão acelerada do solo provocada tanto pela água como pelo vento é responsável pelo 56% e 28% da degradação dos solos no mundo, respectivamente (GUERRA; SILVA; BOTELHO, 1999). No Brasil, o principal agente erosivo é a água (DA SILVA, 2004).

O movimento da água através do solo, determinado por processos tais como a infiltração, percolação, escoamento e retenção da água, regula e é fundamental para o entendimento da erosão (BRYAN, 2000). A erosão do solo é um processo formado por três etapas, sendo elas o desprendimento, o transporte e a deposição de partículas.

A primeira etapa do processo erosivo é o desprendimento produzido pelo impacto da gota de chuva que impacta sobre o solo provocando a ruptura dos agregados e, inclusive, produz o transporte das partículas vários centímetros (DURRAH; BRADFORD, 1982). Este processo é chamado salpicamento ou *splash*. Como consequência deste processo ocorre o selamento superficial e a formação de crostas. Define-se selamento superficial como a

reorganização da superfície do solo devido ao impacto da gota durante um evento de chuva, enquanto a crosta é o endurecimento da superfície do solo após o secamento da superfície do solo. O resultado depois de uma série de eventos chuvosos é; primeiro, o desenvolvimento de uma crosta superficial *in situ*, e segundo, uma crosta deposicional, criada pela sedimentação das partículas em pequenas depressões da superfície do solo (GUERRA; SILVA; BOTELHO, 1999). A diferença entre um tipo e outro torna-se relevante em questão do favorecimento da erosão. Ambos os mecanismos contribuem com a diminuição da porosidade e o aumento da densidade superficial do solo, gerando consequentemente uma menor taxa de infiltração e maior escoamento superficial da água (FOX; LE BISSONNAIS; QUÉTIN, 1998).

Na segunda etapa ocorre o transporte das partículas diferenciando-se dois tipos: fluxo laminar e fluxo concentrado (Figura 1). O transporte de partículas pela enxurrada acontece quando o solo está saturado de água e a água escorre pela superfície ou quando a intensidade da precipitação supera a velocidade de infiltração, o qual é mais comum em climas tropicais (GUERRA; SILVA; BOTELHO, 1999).

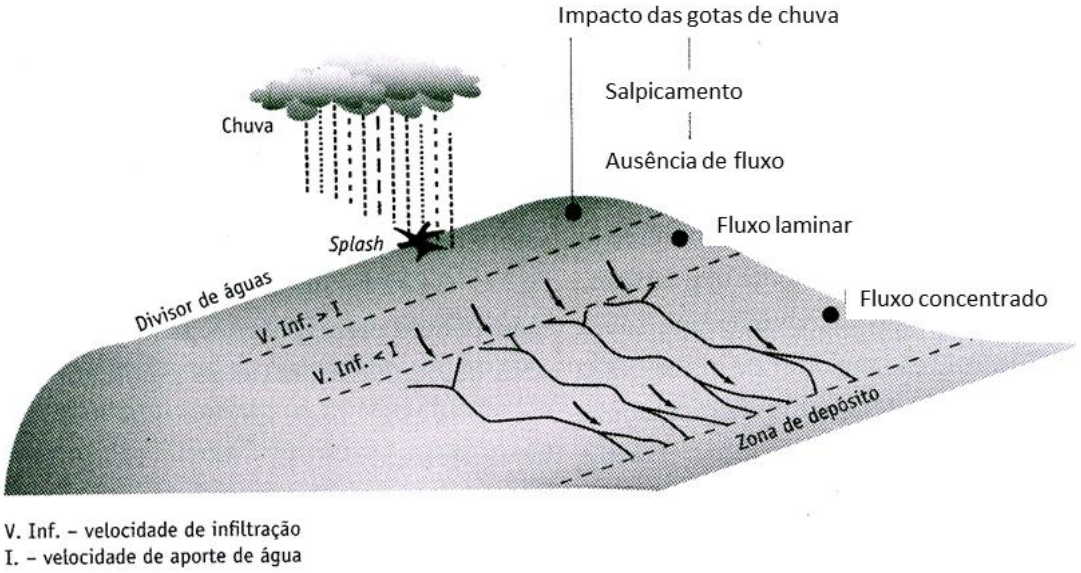


Figura 1 - Esquema do processo erosivo (FLORENZANO, 2008)

Durante um evento chuvoso, a microtopografia, o selamento superficial e o armazenamento superficial de água tem um papel relevante afetando a geração de enxurrada (HELMING; RÖMKENS; PRASAD, 1998). Quando a intensidade da chuva supera a infiltração, as depressões começam a se preencher (com maior rapidez em áreas com menos rugosidade) e, posteriormente, se conectar criando uma lâmina de água superficial que

transporta as partículas desprendidas pelo impacto da gota da chuva (DARBOUX et al., 2002). Este tipo de processo também é conhecido como erosão laminar e é o primeiro estágio do processo erosivo após o salpicamento que transporta as partículas desprendidas (TOY; FOSTER; RENARD, 2002). A concentração de sedimentos e velocidade do fluxo aumenta à medida que a água desce pela encosta favorecendo a concentração do fluxo e a formação de pequenos canais. No momento que o fluxo laminar torna-se fluxo concentrado aumenta a turbulência da água, o potencial erosivo da enxurrada e, consequentemente, o acréscimo do número de partículas desprendidas e transportadas (NEARING; PARKER, 1994). O aumento da concentração de sedimentos no interior do fluxo concentrado provoca um forte atrito entre as partículas e o fundo dos pequenos canais, causando maior desprendimento e o aprofundamento dos canais (GUERRA; SILVA; BOTELHO, 1999), podendo formar voçorocas efêmeras e voçorocas. Assim, no fluxo laminar o transporte de sedimentos é seletivo já que este somente tem energia para transportar um determinado tamanho de partículas, enquanto o transporte provocado pelo fluxo concentrado caracteriza-se por transportar partículas e agregados de tamanho heterogêneo (ZHANG; NEARING; NORTON, 2000).

A terceira e última etapa do processo erosivo é a deposição das partículas desprendidas do solo tanto pelo salpicamento quanto pelo escoamento superficial. A sedimentação acontece após ou durante a chuva, quando as partículas de solo são desprendidas e transportadas vertente abaixo, sendo retidas nas depressões, concavidades das vertentes, plantas ou qualquer outro obstáculo. A taxa de desprendimento decresce com o incremento da carga de sedimento transportada, já que reduz as forças do fluxo que removem as partículas do solo e a intensidade da turbulência. Deste modo, quando o peso da carga impede o transporte ocorre a deposição das partículas (MERTEN; NEARING; BORGES, 2001). Geralmente, o material é depositado segundo o tamanho e densidade das partículas, sendo depositado em primeiro lugar o material mais grosso e denso, depois as partículas finas que recorrem maiores distâncias (BERTONI, 2005; TOY; FOSTER; RENARD, 2002). O diâmetro médio do sedimento depende da intensidade da chuva e da força da enxurrada, ocorrendo uma correlação positiva entre o diâmetro das partículas desprendidas e a energia cinética da precipitação sobre o solo nu (PIERI et al., 2009).

A erosão é um processo complexo porque depende da interação de vários fatores como, por exemplo: litologia; geologia (falhas, descontinuidades, presença de diaclases, xistosidade) (FLORENZANO, 2008); erosividade da chuva (potencial erosivo da chuva), a qual depende do clima de cada região; intensidade, frequência e duração da chuva; e tamanho

da gota da chuva (NEARING; BRADFORD; HOLTZ, 1987). Outro fator e a topografia ou relevo onde a declividade, orientação, convexidade e extensão do terreno influem no aumento da erosão, sendo maior nas ladeiras declivosas, longas e convexas, pois favorecem a enxurrada e dificultam a infiltração (TOY; FOSTER; RENARD, 2002). O tipo e porcentagem de cobertura vegetal que cobre a superfície do solo influenciam de forma relevante a proteção física do solo do impacto direto da gota da chuva e da ação do vento. Por isso, este ponto está relacionado com outro fator que é o uso da terra destacando o tipo de uso, manejo, práticas agrícolas e a intensidade destas (HUMBERTO, 2008).

A erodibilidade do solo (resistência do solo à erosão) é um parâmetro relacionado intrinsecamente com o solo, e é dependente dos seus atributos como: textura, teor de matéria orgânica, conteúdo e tipo de argila, estrutura do solo relacionada com a porosidade e estabilidade dos agregados, pH e teor de água (AGASSI, 1996; BISSONNAIS, 1996). A baixa estabilidade dos agregados do solo se traduz em uma maior susceptibilidade à erosão (CANTÓN et al., 2009). Algumas das propriedades dos solos que favorecem a erosão estão relacionadas com a alta capacidade de dispersão das partículas de argila e ao baixo grau de floculação das partículas do solo (BOVI, 2013). Portanto, a presencia de determinados elementos como o cálcio, os óxidos de ferro e alumínio favorecem a floculação e estabilidade dos agregados e ajudam a diminuir a susceptibilidade do solo à erosão (AGASSI, 1996). Cabe destacar, que estas propriedades estão fortemente relacionadas com a litologia.

A erosão é considerada um processo dinâmico de diferentes escalas temporais. Os atributos físicos e químicos do solo mudam durante o mesmo episódio chuvoso interferindo na taxa de erosão (BRYAN, 2000). A chuva afeta diretamente a porosidade do solo modificando a distribuição, tamanho e forma dos poros, sendo que, o aumento da precipitação acumulada induz a redução do número dos macroporos e poros alongados que favorecem a infiltração rápida da água (ROUSSEVA; TORRI; PAGLIAI, 2002). A distribuição da precipitação ao longo do ano e os diferentes ciclos estacionais influenciam a porcentagem de cobertura do solo e a umidade do solo, entre outros. O aumento da energia e da intensidade da chuva durante os meses quando a umidade do solo tende a ser maior faz com que aumente a erodibilidade do solo, já que a maior umidade do solo afeta certas condições físicas que favorecem a enxurrada (TOY; FOSTER; RENARD, 2002). Por outro lado, ao final da época seca, a vegetação se encontra em situação crítica, portanto, no início das chuvas o solo não está totalmente protegido pela vegetação observando-se um incremento da erosão (KIRKBY; MORGAN, 1980).

2.1.2 Tipos de erosão

Existem várias formas de erosão hídrica: erosão pela gota de chuva, erosão laminar, erosão em sulcos, voçorocas efêmeras, voçorocas e erosão sub-superficial ou *piping* (MORGAN, 2005b; TOY; FOSTER; RENARD, 2002). Cabe destacar, a importância neste estudo do entendimento das voçorocas e *piping*, portanto, a revisão bibliográfica será focada nestes dois tipos de erosão.

A erosão em voçorocas acontece com a concentração do fluxo da enxurrada em canais visíveis que adquirem um caráter mais erosivo devido ao incremento da turbulência e velocidade do fluxo. Normalmente é causada por vários mecanismos que agem em diferentes escalas temporais e espaciais, o qual faz o seu estudo muito complexo (MORGAN, 2005b). O avanço da erosão nas voçorocas acontece na cabeceira de forma montante onde são formadas as alcovas de regressão as quais são responsáveis por 30% do volume total do material retirado da cabeceira (GUERRA; SILVA; BOTELHO, 1999). Somado a isto, o crescimento continuado ocorre pelo aprofundamento do fundo da voçoroca e pela ampliação através do retrocesso das paredes laterais, sendo este último um processo cíclico. Primeiramente as paredes são verticais, em seguida, o fluxo erode a parte inferior que deixa a parte superior do solo sem sustento e, portanto, pelo próprio peso colapsa e cai. Aqui influi também a água de percolação que aflora pelas paredes ocorrendo o aumento do material liquefeito e o aceleramento da taxa do recuo regressivo das alcovas de regressão das paredes. Após a queda, o solo é facilmente erodido e os sedimentos são transportados, o qual significa um aumento da taxa de erosão local. Depois deste incremento, a taxa de erosão e carga de sedimentos se estabiliza. O ciclo se repete e continua até que o tamanho da voçoroca é tão grande que a erosividade do fluxo não consegue erodir mais as paredes ou a vegetação consegue estabiliza-la (TOY; FOSTER; RENARD, 2002).

Estudos apresentados por GUERRA, SILVA e BOTELHO (1999) mostram que a evolução das voçorocas se dá pela formação de grandes incisões que podem apresentar características diferentes. Estes autores definiram dois tipos de incisões, aquelas chamadas conectadas e outras chamadas desconectadas da rede hidrográfica (Figura 2). O processo de formação de voçorocas pode ser resultado da atuação de um ou dos dois tipos de incisão. Quando atuando de forma individualizada, as incisões desconectadas avançam para montante e criam um cone de dejeção, enquanto que as conectadas expandem-se para montante em forma lineal a partir da rede hidrográfica. Se os dois tipos de incisão ocorrem numa mesma voçoroca, no local de integração forma-se um degrau que provoca um aumento localizado do material erodido.

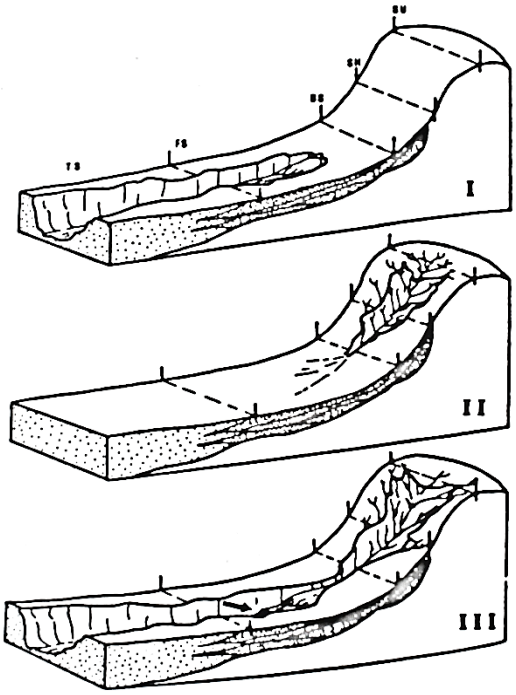


Figura 2 - Modelo de evolução de voçorocas. I: voçoroca conectada da rede hidrográfica. II: voçoroca desconectada de rede. III: integração dos tipos de voçorocas, a seta marca o degrau de erosão formada pela integração. Fonte: (GUERRA; SILVA; BOTELHO, 1999)

A erosão subsuperficial ou *piping* é um processo erosivo que a diferencia dos outros acontece pela remoção de material no interior do solo, atribuída aos fluxos de agua subsuperfíciais concentrados que circulam através dos macroporos em materiais geralmente arenosos, inclusive podem ocorrer também em materiais mais finos, como os siltosos e argilosos (PARKER, 1964). Os dutos ou túneis formam-se a partir do carreamento de pequenas partículas do solo, argila e outros coloides, ou mesmo através da remoção dos componentes do solo por solução. Ou seja, neste processo agem forças físicas e químicas que arrastam os sólidos e os componentes dissolvidos em caminhos preferenciais (AGUSTIN; ARANHA, 2006). Este processo tem sido observado tanto em ambientes naturais quanto antropogênicos, e em diferentes climas, litologias e depósitos, bem como sob diferentes tipos de uso da terra e cobertura vegetal (ROMERO DÍAZ et al., 2007).

A causa da formação do *piping* pode ser de diferentes origens: físico, química ou biológica. Entre as razões mais frequentemente evocadas destaca: a existência de um gradiente hidráulico relacionado com um gradiente textural que induz uma diferença na porosidade-permeabilidade dos diferentes horizontes do solo, e a presença abundante de sódio que podem provocar a dispersão das argilas (FAULKNER, 2006; VERACHTERT et al.,

2013). Os *pipings* não se desenvolvem em solos onde as taxas de infiltração são baixas e gradientes são muito suaves, porque sem gradientes hidráulicos e um mecanismo que faça concentrar a água percolada (por exemplo, uma mudança acentuada permeabilidade entre diferentes horizontes de solo) o processo de *piping* é inexistente (FAULKNER; SPIVEY; ALEXANDER, 2000). A formação de *pipings* pode ocorrer, também, após períodos de seca prolongados onde os processos de contração favorecem a ocorrência de fissuras. Estas fissuras podem reativar percolações concentradas subsuperficiais após a instalação de chuvas intensas e irregulares (BULL; KIRKBY, 1997). Estes processos têm uma relação negativa com a declividade, ou seja, tendem ocorrer em maior número nas áreas mais planas (ROMERO DÍAZ et al., 2007) que favorecem a infiltração da água.

2.1.3 Impactos da erosão

A erosão causa diversos impactos que podem ser classificados como intrínsecos e extrínsecos (*on-site* e *off-site erosion impacts*). Os efeitos intrínsecos são os impactos causados na própria área onde a erosão está ocorrendo, como a perda de solo e de área agricultável, diminuição da matéria orgânica e nutrientes, alterações físico-químicas dos atributos do solo, redução da quantidade e diversidade da biota do solo, redução do potencial produtivo dos solos, maior uso de fertilizantes e aumento dos custos operacionais (CROSSON, 2007; LAL, 2001; MORGAN, 2005b; PIMENTEL et al., 1995). Estes fatores somados afetam a produção de alimentos de forma significativa o que agrava os problemas sociais e a segurança alimentar das nações (PIMENTEL, 2006). Além disso, essa degradação provoca uma mudança nas fronteiras agrícolas que se expandem anualmente sobre as áreas naturais.

Já os efeitos extrínsecos são aqueles relacionados aos problemas causados pela erosão fora da área onde ocorre. Os principais efeitos são: o assoreamento, contaminação e eutrofização de cursos de água, redução de biodiversidade da fauna e flora de diversos ecossistemas pela sedimentação, danos a construções civis (casas, estradas, pontes, etc.) e ocorrência de enchentes e riscos naturais cada vez mais frequentes e severos. No caso dos reservatórios de água, a sedimentação provoca a redução da capacidade de armazenamento, redução da produção de energia pelas hidroelétricas, diminuição das atividades de lazer e perdas na produção na aquicultura de maneira geral (CROSSON, 2007; LAL, 2001; MORGAN, 2005b; PIMENTEL et al., 1995).

Cada ano aproximadamente 10 milhões de hectares de terras cultivadas são perdidas devido à erosão, processo que ocorre com uma velocidade de 10 a 40 vezes mais rápido que a

taxa de renovação do solo (PIMENTEL, 2006). A degradação da fertilidade dos solos e o aumento da população produzem mudanças no uso da terra tais como o desmatamento das florestas para obter mais território destinado para agricultura e pastagens. Quando a superfície do solo fica exposta, especialmente após o desmatamento, incrementa-se a erosão. A erosão acelerada afeta as reservas e fluxos de carbono porque quebra os agregados, expõe o carbono aos elementos climáticos e mineraliza a matéria orgânica (SIVAKUMAR, 2007). Assim, a queda do sequestro do carbono orgânico contribui com o aumento do carbono na atmosfera, portanto, a erosão pode incrementar o aquecimento global (HUMBERTO, 2008; LAL, 2004).

O custo econômico ocasionado pela erosão tem sido analisado por diferentes autores (LAL, 1998; PIMENTEL et al., 1995; TELLES et al., 2013; TELLES; GUIMARÃES; DECHEN, 2011; URI, 2000). Os custos totais dos danos pela erosão eólica e hídrica e os custos de prevenção da erosão a cada ano é de 44 bilhões de dólares somente nos EUA (PIMENTEL et al., 1995). Na escala mundial, a erosão hídrica responde pela degradação de 1 bilhão de hectares de solo (LAL, 1998). Isto totaliza um prejuízo de U$S 400 bilhões dólares/ano entre planos de recuperação de áreas degradadas e perdas na produtividade agrícola (LAL, 1998). O Brasil não está imune a esses problemas, e grandes áreas do seu território têm sido identificadas com solos bastante degradados (Teixeira et al, 2012). Um estudo brasileiro estima o custo da erosão na perda de nutrientes do Estado de Santa Catarina entre 14,83 e 24,94 dolares/ha·ano (BERTOL et al., 2007).

Os estudos sobre os processos erosivos ajudam na compreensão, conservação do solo e mitigação de impactos. Assim, este trabalho pretende estudar e datar os processos erosivos em voçorocas mediante o uso da dendrogeomorfologia que é uma ciência relativamente recente e proveniente da dendrocronologia.

2.2 Dendrocronologia

A dendrocronologia (proveniente do grego *dendron*: madeira, *cronos*: tempo e *logus*: estudo) é a ciência caracterizada pelo estudo dos anéis de crescimento das árvores. O estudo dos anéis de crescimento das árvores é bastante antigo, sendo que há relatos de filósofos da antiga Grécia que mostraram interesse nestes aspectos anatômicos das árvores ou no século XVI com alguns estudos feitos por Leonardo Da Vinci (MAIA et al., 2001). Mesmo assim, somente no século XX, a dendrocronologia se consolida como ciência a partir das pesquisas de Andrew E. Douglass na Universidade de Arizona que relacionaram séries temporais de anéis de crescimento com eventos climáticos (SCHWEINGRUBER, 1988).

Os anéis de crescimento das árvores respondem as diferentes estações climáticas. O desenvolvimento do câmbio vascular, tecido responsável pelo crescimento secundário das árvores, é influenciado pela chegada de baixas temperaturas do inverno que paralisa o crescimento da planta (SCHWEINGRUBER, 1988).

Os estudos iniciais assinalavam que apenas as árvores de clima temperado criavam anéis de crescimento, já que estas regiões têm períodos sazonais bem definidos que induzem às árvores a produzir uma nova camada de tecidos no lenho a cada ano. Durante anos assumiu-se que devido às temperaturas constantes das regiões tropicais, as árvores destas regiões apresentavam um crescimento contínuo e ausência de tais anéis (WORBES, 2002) levando a uma falta de informação sobre padrões e as taxas de crescimento das árvores tropicais. Nestas áreas, os padrões sazonais de crescimento da madeira estão relacionados com disponibilidade de água (WORBES, 1995). Encontram-se poucas áreas que tenham condições continuas de precipitação, sendo mais comum encontrar áreas com pelo menos dois meses de condições mais secas. Assim, o padrão de crescimento anual nos anéis das árvores tropicais é induzida pela alternância de períodos de seca curtos e períodos de maior precipitação (LISI et al., 2008; WORBES, 1999, 2002). Atualmente no Brasil já existem inúmeros estudos com diferentes espécies tropicais e subtropicais que constatam anéis de crescimento anual (BOTOSSO; VETTER; TOMAZELLO FILHO, 2000; LISI et al., 2008).

2.2.1 Anatomia do lenho das árvores

A madeira é constituída por um conjunto heterogêneo de diferentes tipos de células e tecidos, apresentando propriedades específicas importantes no desempenho de funções vitais da planta relacionadas com a condução de líquidos, transformação, sustentação, armazenamento e transporte de substancias nutritivas (BOTOSSO, 2011).

O meristema é o tecido encarregado pelo crescimento da planta. Existem dois tipos: meristema primário relacionado com o crescimento longitudinal da planta e o meristema secundário que é o responsável pelo incremento em espessura de caules e raízes, mediante a adição lateral de novas células (APPEZZATO-DA-GLORIA; CARMELLO-GUERREIRO, 2006). O tecido meristemático secundário, também chamado de câmbio, gera novos elementos celulares constituídos por uma camada de células situada entre o xilema e o floema, visível só no microscópico (BOTOSSO, 2011) (Figura 3).

O xilema é o tecido responsável pelo transporte de água e solutos desde as raízes, armazenamento de nutrientes e suporte mecânico. Ele está formado por elementos condutores, células parenquimáticas e fibras (Figura 3). Por outro lado, o floema é o tecido responsável

pela condução de nutrientes inorgânicos e orgânicos (APPEZZATO-DA-GLORIA; CARMELLO-GUERREIRO, 2006). Cabe destacar as traqueídes entre os tipos de células do xilema própria das gimnospermas. A diferença das angiospermas, as gimnospermas possuem uma estrutura mais simples: não têm vasos condutores e contêm escassas fibras. De tal modo, as traqueídes realizam a função de condução e sustentação e constituem 90% do volume xilemático total das coníferas. Em geral, as traqueídes têm forma de prisma alongado com extremidades em forma de pontas que funcionam como canais. Dispõem-se em fileiras longitudinais paralelas ao eixo do tronco e justapondo-se pelas extremidades não perfuradas, deste modo tornando-se aptas para o transporte da água e dos sais minerais (GARCÍA ESTEBAN, 2003).

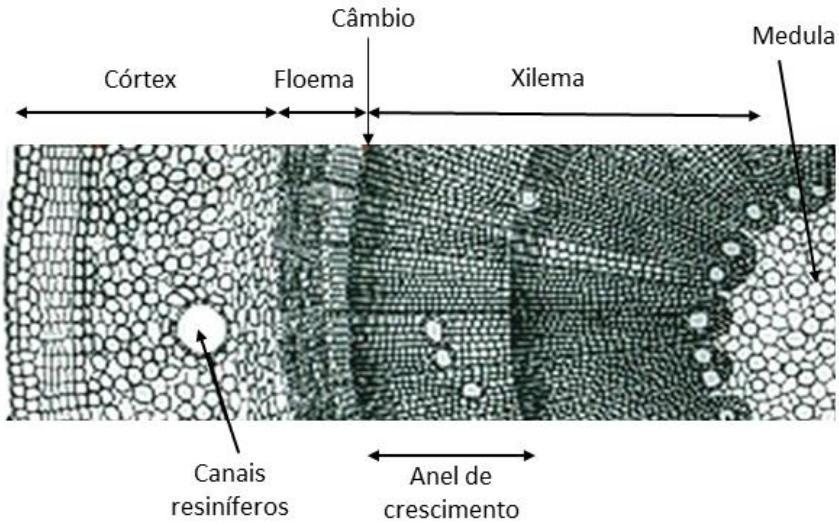


Figura 3- Seção transversal do caule de gênero Pinus. Adaptado de ARBO et al. (2013)

Durante o crescimento, os hormônios desencadeiam a ação do câmbio o qual é estimulado para dividir-se em camadas tanto em direção à casca quanto em direção à medula. As células que são formadas em direção à casca irão compor o floema e as que estão em direção ao interior do caule irão compor o xilema. Por tanto, considerando que a produção de células se origina no perímetro do caule, a árvore aumenta o diâmetro “de fora para dentro”, o que se chama de crescimento secundário das plantas (COSTA, 2001). Desenvolve-se a cada ano uma nova camada de células que quando observadas em seção transversal, revelam camadas mais ou menos concêntricas ao redor da medula. Estas formações são os anéis de crescimento que decorrem da atividade periódica do câmbio. A atividade do câmbio está regulada pelas condições climáticas, por exemplo, em clima temperado, as baixas temperaturas induzem a parada do câmbio até o início da primavera. Cada vez que o câmbio

retoma a atividade interrompida, deixa um sinal representado pela diferença entre as células formadas antes da parada de seu funcionamento e as que se desenvolvem após a reativação (APPEZZATO-DA-GLORIA; CARMELLO-GUERREIRO, 2006), evidenciando os diferentes anéis.

Dentro do anel podem se diferenciar duas regiões: lenho inicial e lenho tardio. O lenho inicial é a área do anel produzida no início da estação de crescimento caracterizada por células com maiores lumens, paredes finas e, consequentemente, densidade mais baixa, sendo representada por uma coloração mais clara. O lenho tardio é a última camada formada na estação de crescimento. Constitui-se de células de lumens menores e paredes mais espessas, adquirindo, um aspecto mais escuro (STOKES; SMILEY, 1996). A fase de transição entre as duas regiões pode ser abrupta ou contínua, a qual é determinada tanto por fatores genéticos de cada espécie quanto climáticos. Porém, podem existir as chamadas variações intra-anuais no lenho inicial ou lenho tardio que são causadas por oscilações climáticas extremas de curto prazo durante a estação de crescimento. São ocasionalmente encontradas em zonas temperadas, mas são muito comuns em regiões subtropicais e áridas (SCHWEINGRUBER, 2007).

As flutuações intra-anuais de densidade (IADFs), também conhecidas como falsos anéis, permitem uma compreensão mais fina das respostas de crescimento das plantas à variabilidade ambiental (DE MICCO et al., 2014). Porém, os anéis falsos dificultam a identificação e datação certa dos anéis anuais. O método tradicional de análise dendrocronológica permite a identificação de IADFs através de técnicas de datação cruzada entre as cronologias de diferentes árvores. As árvores que se desenvolveram em condições semelhantes ao longo de um período de ano normalmente apresentam sincronismo na variação da largura dos anéis de crescimento permitindo a datação cruzada (STOKES; SMILEY, 1996). Existem muitas ferramentas disponíveis para a realização da datação cruzada, porém a última avaliação vai depender do critério pessoal do dendrocronologista (COOK; KAIRIŪKŠTIS, 1992). A identificação adequada dos anéis falsos é necessária, bem como uma normalização da medição e procedimentos para reduzir a subjetividade no processamento dos dados (DE MICCO et al., 2014).

Nas coníferas, a mudança entre os anéis está marcada por traqueídes pequenas e achatadas com parede grossa (lenho tardio) adjacentes a uma área de traqueídes grandes de paredes finas (lenho inicial) sendo bastante marcada (SCHWEINGRUBER; BÖRNER; SCHULZE, 2006). Normalmente, quando o padrão é diferente, trata-se de flutuações de densidade ou da mudança entre as duas regiões do anel (Figura 4).

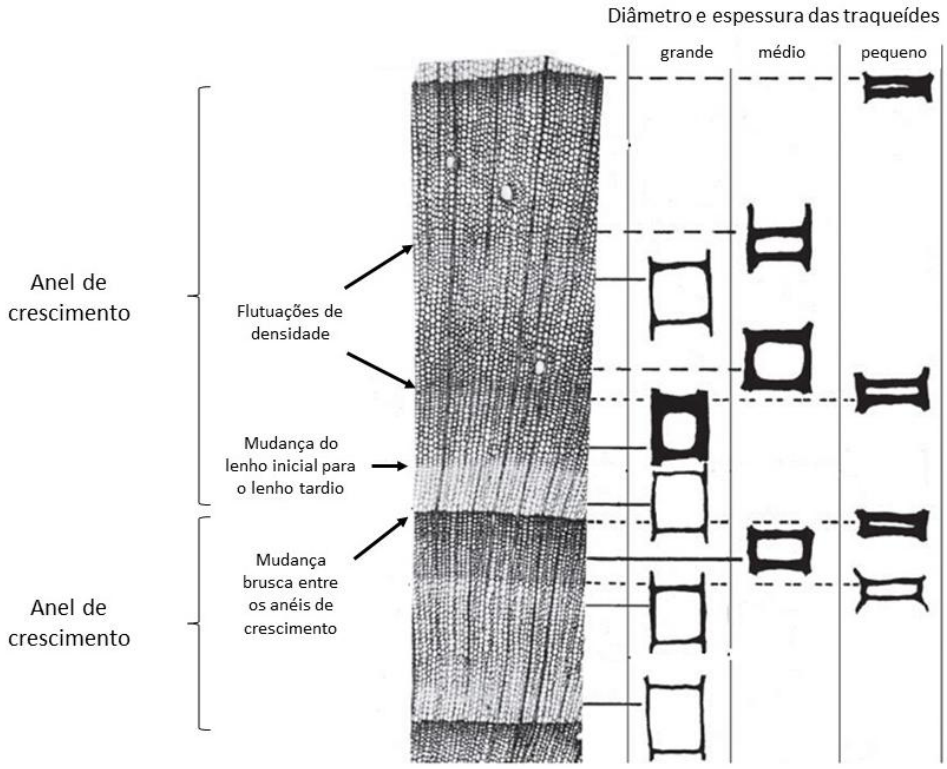


Figura 4 - Distinção entre flutuações de densidade e anel de crescimento através de diferenças entre o tamanho, espessura das traqueídes, bem como a da parede da célula Adaptado de SCHWEINGRUBER (2007)

2.2.2 Dendrogeomorfologia

Existem diferentes ciências derivadas da dendrocronologia que associa o crescimento das árvores com fatores externos (dendroclimatologia, dendroecologia, dendroquímica, etc). Desta forma, pode-se citar a dendrogeomorfologia como um ramo da dendrocronologia que relaciona a caracterização dos anéis de crescimento das árvores com processos geomorfológicos permitindo a reconstrução cronológica e ocorrência de eventos erosivos ou riscos naturais.

Os primeiros estudos dendrogeomorfológicos que relacionaram o crescimento dos anéis das árvores com processos geomorfológicos são da década de sessenta do século passado (LA MARCHE, 1961). Porém, as primeiras publicações utilizando esta técnica só apareceram na década de setenta do mesmo século (ALESTALO, 1971). Na última década, a dendrogeomorfologia ganhou bastante importância e cada vez está sendo mais utilizada para a datação de diversos tipos de eventos e processos geomorfológicos. Atualmente, aplica-se para o estudo da erosão do solo (BALLESTEROS-CÁNOVAS et al., 2013a; HITZ et al., 2008a), movimentos de massa ou *landslides* (MALIK; WISTUBA, 2012; ŠILHÁN; STOFFEL,

2015), atividade de avalanches de rochas ou *rockfall* (FAVILLIER et al., 2015; SCHNEUWLY; STOFFEL, 2008; STOFFEL et al., 2005), glaciais (GÄRTNER; HEINRICH, 2013), sedimentação (MIZUGAKI; NAKAMURA; ARAYA, 2006), inundações (CASTELLER et al., 2015; GÉNOVA et al., 2015; RUIZ-VILLANUEVA, 2012; RUIZ-VILLANUEVA et al., 2010), erosão costeira em lagos (FANTUCCI, 2007) ou avalanches de detritos ou *debris flood* (BOLLSCHWEILER; STOFFEL, 2010; TICHAVSKÝ; ŠILHÁN, 2015), entre outros. Este método é baseado na observação de mudanças macro ou microscópicas da anatomia da madeira do caule e raízes, que foram provocadas por processos geomorfológicos e que através da identificação dos anéis anuais de crescimento permite conhecer o ano da perturbação (BODOQUE et al., 2005; GÄRTNER; SCHWEINGRUBER; DIKAU, 2001).

Os estudos da datação de processos erosivos em voçorocas foram sempre complexos e tradicionalmente têm sido efetuados através da interpretação de fotografias aéreas e monitoramento (DELLA SETA et al., 2009; MARTÍNEZ-CASASNOVAS, 2003; NADAL-ROMERO et al., 2008; NYSSEN et al., 2006; POESEN et al., 2003). Recentemente, encontram-se na literatura estudos que descrevem a dendrogeomorfologia como um método alternativo com potencial para analisar a erosão em voçorocas (BODOQUE et al., 2011b; CORONA et al., 2011; MALIK, 2008; VANDEKERCKHOVE et al., 2001). Este método permite datar processos erosivos do tipo voçorocas mediante o estudo de raízes expostas. Uma das vantagens do uso de raízes expostas para o estudo da erosão em comparação com os métodos convencionais é que os parâmetros erosivos podem ser quantificados anualmente (BALLESTEROS-CÁNOVAS et al., 2013a; BODOQUE et al., 2005). Este enfoque igualmente pode ser proveitoso em regiões onde as informações disponíveis referentes a processos erosivos são limitados ou nulos.

Nos estudos de dendrocronologia é preciso encontrar árvores que desenvolvam anéis de crescimento. As espécies mais utilizadas para estes estudos dendrogeomorfológicos são as coníferas, porque as mudanças anatômicas são mais obvias do que árvores deciduais (GÄRTNER; SCHWEINGRUBER; DIKAU, 2001). As raízes expostas das coníferas têm sido estudadas como espécie controle para determinar as mudanças anatômicas das espécies deciduais (HITZ et al., 2008a). Todos os estudos sobre dendrogeomorfologia têm se focado nas áreas do clima temperado, limitado à América do Norte e Europa, sendo um desafio para futuros estudos o uso da dendrogeomorfologia em áreas tropicais (STOFFEL et al., 2013b). Contudo, no Brasil, na mesma área de estudo deste trabalho, já foram iniciadas as primeiras

pesquisas de datação da erosão mediante o uso de raízes de árvores de espécies nativas (BOVI, 2013).

2.2.3 Influência dos processos geomorfológicos nas árvores.

Na sequência serão apresentadas as principais mudanças no crescimento de árvores que podem permitir a determinação de eventos geomorfológicos.

2.2.3.1 Madeira de reação

Quando uma árvore é deslocada do seu crescimento natural, ou seja, da sua posição de equilíbrio, (por exemplo, verticalidade do caule) acontece a formação de tecidos no lenho de estrutura anatômica e composição química bastante diferentes, os quais têm a capacidade de forçar a árvore voltar na orientação original. Estes tecidos são referidos como madeira de reação das arvores é são formados por uma mudança no meio ambiente das árvores (TIMELL, 1986a).

A principal função da madeira de reação é recuperar a orientação ou posição original que assegura o máximo crescimento. Na maioria das gimnospermas, o crescimento radial incrementa no lado inferior do tronco inclinado desenvolvendo a madeira de reação neste mesmo lugar. Este tipo de madeira de reação formada em gimnospermas é denominado madeira de compressão (STOFFEL, 2010). A madeira de compressão também é localizada nos ramos e nas raízes mantendo o seu crescimento horizontal (FAYLE, 1976; GARCÍA ESTEBAN, 2003) e ajustando a curvatura. A madeira de compressão tem a capacidade de expandir-se ao longo da fibra enquanto é formada, criando uma pressão axial que lentamente coloca o caule na posição original, normalmente na orientação vertical. Todos os movimentos desta madeira nas gimnospermas se desenvolvem da mesma forma visando suportar o peso da árvore , tronco e copa, bem como possibilitar a reorientação gradual do seu crescimento (TIMELL, 1986a) (Figura 5). Por outro lado, nas angiospermas, o crescimento radial do caule acontece na parte superior do tronco inclinado, portanto, a madeira de reação é nomeada madeira de tensão (Figura 5). A madeira de tensão tem a capacidade de esticar o caule *in situ* ao longo da fibra. Ou seja, pode-se dizer que a madeira de compressão empurra o caule para cima, enquanto madeira de tensão o puxa (TIMELL, 1986a).

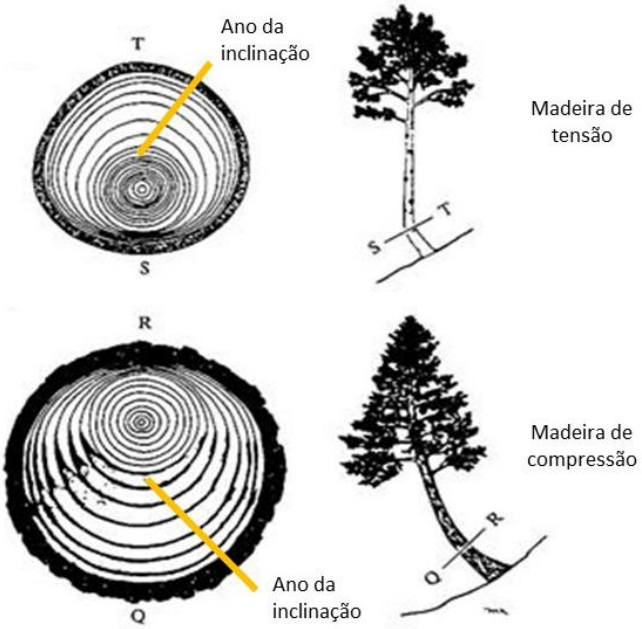


Figura 5 - Madeira de reação para angiospermas e gimnospermas
Adaptado de FRITTS, (2001).

A madeira de compressão tem diferentes características tanto macroscópicas quanto microscópicas, entre as principais diferenças aparecem; escurecimento da cor devido ao engrossamento das paredes celulares, diminuição do lume das traqueídes, aparição de fendas nas paredes celulares ou desenvolvimento excêntrico dos anéis de crescimento (GARCÍA ESTEBAN, 2003; STOFFEL; KLINKMÜLLER, 2013). A madeira de reação vai ser visível após a inclinação ou um determinado evento, permitindo a datação exata da perturbação (FRITTS, 2001; STOFFEL, 2010).

2.2.3.2 Excentricidade

O crescimento excêntrico é a tendência de uma única árvore para desenvolver anéis mais largos de um lado do tronco do que do outro causado por algum estresse mecânico e conectado com ligeira inclinação do caule da árvore (SCHWEINGRUBER, 2007).

A excentricidade também aparece em raízes com o intuito de redirecionar o crescimento. A madeira criada em raízes após a exposição tem uma estrutura diferente da madeira produzida sob uma cobertura do solo (BODOQUE et al., 2011a; CORONA et al., 2011; GÄRTNER; SCHWEINGRUBER; DIKAU, 2001; MALIK, 2008; STOFFEL; KLINKMÜLLER, 2013; VANDEKERCKHOVE et al., 2001) sendo parecida com a madeira do caule. Normalmente as raízes enterradas apresentam formas concêntricas e raízes expostas formas excêntricas (HITZ et al., 2008a). O crescimento das raízes está associado aos

processos de gravitropismo, ou seja, a gravidade redireciona o crescimento das raízes para o solo. Isto, explica que quando a raiz está sendo exposta tende de crescer de forma excêntrica para baixo procurando condições mais favoráveis oferecidas pelo solo. No entanto, o ângulo em relação ao vetor de crescimento da gravidade pode ser alterado devido a mudanças no seu microambiente, já que pode responder à umidade (hidrotropismo), luz (fototropismo) distribuição de nutrientes (quimiotropismo), obstáculos (tigmotropismo), etc. (AZCÓN-BIETO; TALÓN, 2000; CASSAB; SÁNCHEZ-GUEVARA, 2007).

Estudos recentes revelaram as vantagens do estudo da excentricidade como uma ferramenta para datar processos geomorfológicos (MALIK; WISTUBA, 2012; WISTUBA et al., 2013, 2015). Excentricidade é mais frequentemente usada em combinação com estudos da madeira de reação (COROMINAS; MOYA, 2010; ŠILHÁN; STOFFEL, 2015; STOFFEL et al., 2005). Em estudos em *P. sylvestris* concluíram que a excentricidade aparece alguns anos antes quando comparado com a ocorrência de madeira de compressão (KOPROWSKI; WINCHESTER; ZIELSKI, 2010). Além disso, demonstrou- se outra vantagem da excentricidade, a sua independência a partir da idade e tamanho relativo da árvore (MÄKINEN, 1998). Por conseguinte, a excentricidade pode ser mais sensível e, por isso, um indicador mais exato para datações geomorfológicas do que a ocorrência de madeira de compressão (WISTUBA et al., 2013).

A literatura reporta a existência de diversos índices para calcular a excentricidade do caule de árvores inclinadas, por exemplo, aquele relacionando a diferença entre a parte mais estreita e larga do anel (ROZAS, 2003; SCHWEINGRUBER, 1996) ou relacionando o raio do lado da declividade e o raio perpendicular deste (BRAAM; WEISS; BURROUGH, 1987). O índice mais recente permite distinguir com clareza a direção de excentricidade utilizando o raio do caule que acompanha a declividade e o raio oposto à declividade (WISTUBA et al., 2013, 2015). Estes estudos têm trabalhado com a excentricidade do caule, porém são escassos os estudos que analisam de forma quantitativa a excentricidade da raiz.

2.2.3.3 Cicatrizes e canais tangenciais resiníferos (TRDs)

O impacto de agentes externos sobre o caule e as raízes pode causar deformações, supressão da casca, feridas e cicatrizes. Quando isto acontece, a árvore compartimentaliza e inicia a produção excepcionalmente rápida de tecido caloso nas bordas da lesão para evitar infecções pelos organismos e a podridão da madeira (SCHWEINGRUBER, 1993; STOFFEL; KLINKMÜLLER, 2013). Normalmente, o tecido caloso está associado com maior densidade no lenho tardio. A reação da árvore e a cicatrização da ferida dependerá da intensidade do

impacto mecânico, a taxa de incremento anual e idade da árvore (BOLLSCHWEILER et al., 2008).

A presença de feridas e cicatrizes é considerada como um indicador fiável e valioso da atividade dos processos geomorfológicos (BOVI, 2013; CARRARA; CARROLL, 1979; CHARTIER et al., 2016; STOFFEL; CORONA, 2014). Nos últimos cinco anos, a maioria das pesquisas que relacionaram distorções no crescimento das árvores pelos processos geomorfológicos focaram no estudo de cicatrizes e tecidos calosos, madeira de reação e redução do padrão de crescimento (STOFFEL; CORONA, 2014).

A resina protege as plantas da decadência. Coníferas, em particular, tem desenvolvido um sistema especial de canais resiníferos situado no sistema secundário para proteção diante os organismos (SCHWEINGRUBER; BÖRNER; SCHULZE, 2006). A resina é produzida poucos dias depois do impacto e é mantido ao menos 3 semanas depois do distúrbio (KACZKA; DESLAURIERS; MORIN, 2010). Desde o ponto de vista dendrocronológico, a diferença das cicatrizes, a formação de canais de resina muitas vezes não é uma reação imediata à perturbação e, portanto, não pode ser usada de forma precisa para a datação de eventos intra-anuais (SCHWEINGRUBER, 2007). Esta técnica não pode ser usada em *Pinus* porque este gênero gera grande produção de resina que nem sempre está relacionada com os impactos mecânicos (BALLESTEROS et al., 2010).

2.2.3.4 Anomalias em traqueídes, vasos condutores e largura nos anéis de crescimento

Inicialmente os estudos de dendrogeomorfologia eram baseados em evidências externas. Porém, atualmente aplicam-se técnicas de histologia e citologia vegetal que permitem conhecer a época do ano e mês da perturbação (SCHNEUWLY et al., 2009) . Considera-se que as principais causas nas mudanças anatômicas das raízes, por exemplo, são mudanças causadas por um estresse mecânico e/ou mudanças causadas pelo contato com a atmosfera bem seja pela luz, temperatura, umidade ou a redução da pressão da camada do solo (CORONA et al., 2011; GÄRTNER; SCHWEINGRUBER; DIKAU, 2001; HITZ et al., 2008a).

Segundo GÄRTNER et al. (2001) as mudanças que podem ocorrer nas raízes dependem dos processos geomorfológicos, diferenciando entre processos de denudação continua e eventos erosivos que provocam a exposição súbita. Destaca-se principalmente: aumento na porcentagem e número de traqueídes do lenho tardio (BALLESTEROS-CÁNOVAS et al., 2013b; BODOQUE et al., 2005, 2011a; WROŃSKA-WAŁACH, 2014), aumento da espessura da parede celular no lenho inicial (BALLESTEROS et al., 2010)

diminuição do tamanho dos vasos condutores em espécies deciduais (CHARTIER et al., 2016; CHARTIER; ROSTAGNO; ROIG, 2009; FANTUCCI, 2007; HITZ et al., 2008a) e diminuição de 50% no tamanho do lúmen celular no lenho inicial (CORONA et al., 2011; GÄRTNER; SCHWEINGRUBER; DIKAU, 2001; HITZ et al., 2008a; WROŃSKA-WAŁACH, 2014; ZHOU et al., 2013). Observa-se a diminuição na largura do anel de crescimento quando o caule é enterrado ou a raiz é afetada pelo peso de depósitos de algum evento geomorfológico (STOFFEL; CORONA, 2014). Mesmo assim, os mesmos processos podem favorecer um aumento do anel do caule já que foram eliminadas as árvores vizinhas, portanto, menor competição. Por outro lado, os processos de erosão que provocam a exposição de raízes reduzem a pressão do peso do solo sobre as mesmas e, por consequente, induz um aumento da largura do anel (BODOQUE et al., 2005, 2011b; GÄRTNER, 2007).

2.2.4 Estudos dendrocronológicos com o gênero Pinus

Este estudo vai trabalhar com três espécies diferentes do gênero *Pinus*: *Pinus elliottii*, *Pinus taeda* e *Pinus oocarpa.* Em seguida, apresentar-se-ão alguns estudos dendrocronológicos realizados com cada uma destas espécies com o intuito de entender a formação de anéis de crescimento anuais.

Existem poucos estudos dendrocronológicos realizados com *Pinus elliottii Engel*. Em 2002, alguns indivíduos de *P. elliotti* foram correlacionados com sucesso mediante datação cruzada. As árvores foram utilizadas para conhecer a influência da mudança na vazão do rio, antes e depois da construção de uma represa, sobre o crescimento das populações de *P. elliottii* (FORD; BROOKS, 2002). Os mesmos pesquisadores conseguiram correlacionar o crescimento da espécie com fatores hidrológicos (FORD; BROOKS, 2003). Artigos mais recentes mostram correlações entre parâmetros climáticos e séries cronológicas de mais de 139 anos de *P. elliottii* da datação cruzada de 31 árvores (HARLEY; GRISSINO-MAYER; HORN, 2011) e 192 anos com 22 árvores (PARKER; JENSEN; PARKER, 2014). Portanto, atualmente, afirma-se que *P. elliottii* forma anéis anuais. Entretanto, não existem estudos dendrogeomorfológicos com esta espécie.

A presença de anéis de crescimento anuais em *Pinus taeda L.* tem sido mais reconhecida entre a comunidade cientifica a diferença de *P. elliotti* e de *P. oocarpa*. Por isso, aparecem estudos mais antigos nesta espécie que usam a dendrocronologia como ferramenta de análise. Em 1980, foi publicado um artigo que comparava 48 fatores climáticos com uma serie de 30 anos de *P. taeda* (CHANG; AGUILAR, 1980). Existem muitos estudos diversos sobre esta espécie, destacam-se vários na área da dendrocronologia. O primeiro relacionou o

crescimento deste pinheiro com diversos parâmetros climáticos anuais (FRIEND; HAFLEY, 1989), e o segundo estudo, relacionou a resposta dos anéis de crescimento e de algumas propriedades da madeira de árvores sob enriquecimento com CO_2 (TELEWSKI et al., 1999). Outro estudo mais recente relacionou a seca e um distúrbio de origem antrópico sobre o desenvolvimento do *P. taeda* através dos anéis de crescimento (GRAHAM et al., 2012). Finalmente, cabe destacar o trabalho desenvolvido com plantações de *P. taeda* em regiões tropicais fora do habitat nativo da espécie e a sua correlação climática (SAMUELSON et al., 2013). Porém, não existem estudos com esta espécie no campo a dendrogeomorfologia. Além disso, cabe citar, a base de dados de anéis de crescimento do NOAA (ITRD- International Tree-Ring Data) dispõe de cinco series cronológicas de *P. taeda* com correlação significativa para diferentes áreas dos Estados Unidos (ITRD- INTERNATIONAL TREE-RING DATA, 2015).

Não existem muitos trabalhos dendrocronológicos com *Pinus oocarpa Schiede* e na base de dados do NOAA (ITRD- International Tree-Ring Data) não existem series disponíveis. Uma nota de 1980 demostra a criação de uma série cronológica de *P. oocarpa* em Honduras, sendo o suficientemente robusta para poder realizar comparações com o clima e abrir caminho à dendrocronologia nas áreas tropicais (JOHNSON, 1980). Contudo, um estudo mais recente no campo da dendroecologia mostrou o decrescimento do tamanho dos anéis devido à infecção por um parasito (HOWELL; MATHIASEN, 2004).

2.2.5 Densitometria mediante raios X no estudo dos anéis de crescimento

A densidade é considerada uma propriedade do lenho muito importante já que, normalmente, associa-se com as suas características anatômicas, químicas e propriedades mecânicas (SURDI et al., 2014). A densitometria constitui uma grande ferramenta de análise da madeira especialmente importante para a dendrocronologia e outras ciências relacionadas (SCHINKER; HANSEN; SPIECKER, 2003).

Tradicionalmente, a determinação da densidade do lenho foi realizada mediante o uso de corpos de prova de madeira obtidos, geralmente, por métodos destrutivos. Porém, o uso de métodos radiográficos para a determinação da densidade do lenho apresenta vantagens como metodologia não destrutiva, mais rápida, precisa e eficiente no processamento de dados (CASTRO, 2011). Os primeiros estudos de densitometria de lenho de árvores com raios X apareceu nos anos 1960 na França e na década de 90 foi implantado no Brasil com as pesquisas de AMARAL (1994) e AMARAL e TOMAZELLO FILHO (1998) com indivíduos

de *Pinus taeda*. Porém, apesar da extensa literatura, os estudos com esta técnica em árvores tropicais são escassos (TOMAZELLO FILHO et al., 2009).

A técnica de densitometria com raios X pode ser aplicada para a análise do lenho de folhosas e coníferas, fornecendo valores de densidade do lenho e dos anéis de crescimento que permite identificar os limites entre eles e, inclusive, distinguir o lenho inicial e lenho tardio (STOFFEL, 2010). Existem diferentes metodologias de densitometria de raios X, por leitura direta e pelo processamento de imagens digitais de raios X, entre outros. A metodologia de imagens digitais de raios X é mais vantajosa pelos resultados qualitativos adicionais, maior agilidade no processamento de análise do lenho, sendo, portanto, indicada para trabalhos com grande número de amostras do lenho (SURDI et al., 2014). No contexto da dendrogeomorfologia existem poucos estudos que usem esta técnica. Cabe salientar, o recente estudo de GUARDIOLA-ALBERT et al., (2015) onde foram usadas técnicas de raios X para caracterizar a estrutura da madeira no caule de árvores danificadas por processos geomorfológicos. Estes autores destacaram a eficiência da ferramenta e optimização do tempo e dos custos.

3 MATERIAL E MÉTODOS

3.1 Caracterização da área de estudo

Para a seleção do local do presente estudo estabeleceram-se os seguintes critérios: 1) presença de feições erosivas do tipo voçorocas, 2) presença de espécies que mostrassem anéis de crescimento, 3) presença destas espécies com raízes expostas devido ao processo de voçorocamento, e 4) presença de árvores testemunhas que não tivessem sofrido interferência do processo erosivo. Desta forma, foi escolhida uma área da Estação Experimental de Tupi que satisfaz todos os critérios propostos de seleção.

A Estação Experimental de Tupi pertence ao Instituto Florestal do estado de São Paulo o qual está subordinado à Secretaria de Estado do Meio Ambiente. Esta área localiza-se no distrito de Tupi no município de Piracicaba, Estado de São Paulo, sendo a suas coordenadas geográficas longitude 47°32’30’’- 47°31’47’W’ e latitude 22°43’30’’- 22º44’00’’ e altitude média de 540 m (Figura 6). A estação tem uma área de 198.48 ha e está dividido em 53 talhões para a gestão florestal, sendo assim, este estudo foi desenvolvido no talhão 17 com uma área de 1,30 ha.

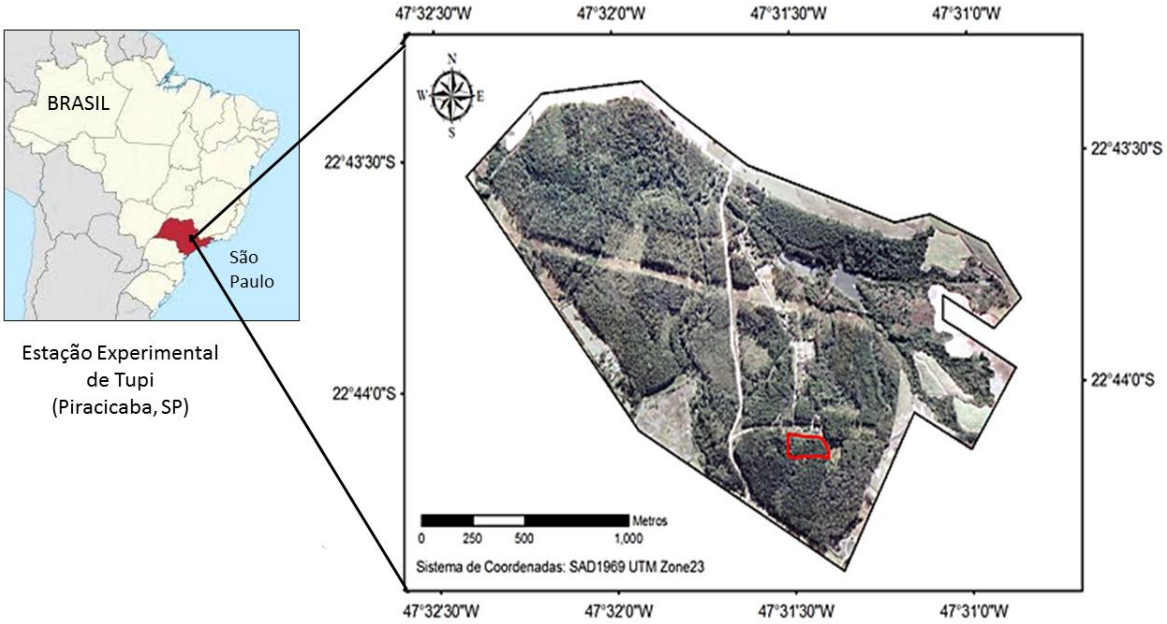


Figura 6 - Localização geográfica da área de estudo, Estação Experimental de Tupi em Piracicaba, SP
Área destacada em vermelho indica o talhão de estudo

3.1.1 Clima

O clima de Piracicaba é classificado como clima mesotérmico úmido subtropical de inverno seco, Cwa, segundo a classificação climática de Koeppen (CEPAGRI, 2015). O clima da região é caracterizado por ter uma precipitação média de 1275 mm, porém contém

uma forte sazonalidade definida em duas estações: a primeira estação com elevada precipitação ocorre no verão e a segunda estação caracterizada pelo deficit hídrico que ocorre nos meses de inverno. Durante os meses de verão (dezembro, janeiro e fevereiro) chove uma média de 590 mm, sendo janeiro o mês mais chuvoso (230 mm) (Figura 7). Por outro lado, observa-se que durante os meses de inverno (junho, julho e agosto) tem uma precipitação media menor a 70 mm, aproximadamente, sendo julho o mês mais seco (15.4mm) (POSTO AGROMETEOROLÓGICO DA ESALQ-USP, 2015). O balanço hídrico da região é caracterizado pela deficiência hídrica no inverno na região e excedente nos meses de verão (Figura 8). Piracicaba apresenta uma temperatura média anual de 22.2 ºC, com média máxima de 28,2°C e mínima de 14,8°C com episódio de geada uma vez a cada quinquênio. O mais destacável é que as temperaturas variam pouco ao longo do ano sendo janeiro o mês mais quente (24.5ºC) e julho o mês mais frio (17.5º).

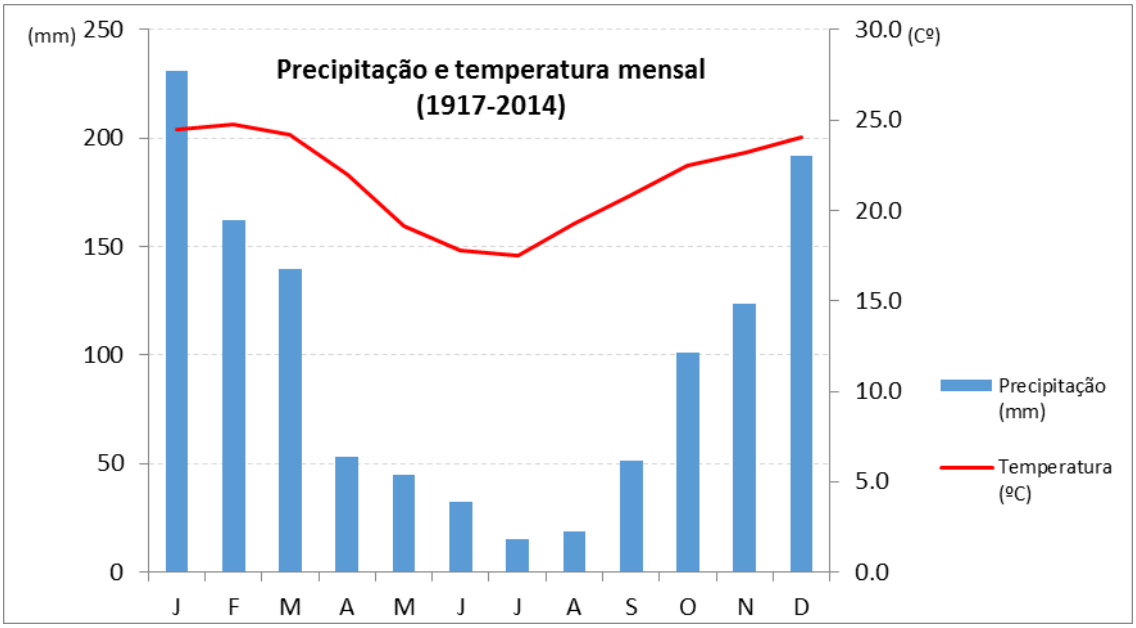


Figura 7 - Dados médios de precipitação e temperatura mensal entre os anos 1917-2014

(Fonte: posto agrometeorológico da ESALQ-USP)

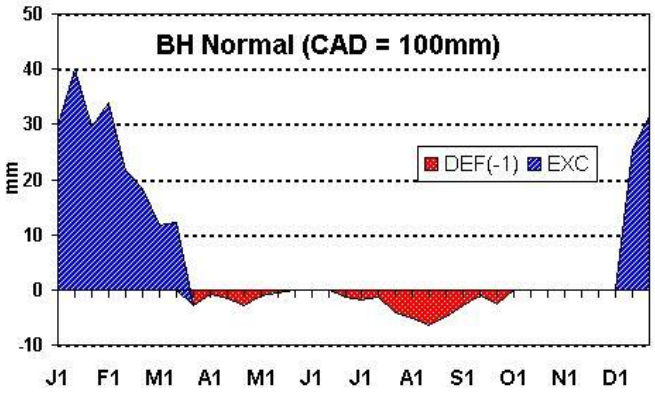


Figura 8 - Balanço hídrico de Piracicaba (Fonte: posto agrometeorológico da ESALQ-USP).

3.1.2 Geologia

A área de estudo está assentada sobre rochas sedimentares paleozóicas do grupo Tubarão, representado, predominantemente, pela formação Itararé e, secundariamente, pela formação Tatuí (VIDAL-TORRADO, 1994). Na formação Itararé encontram-se diamictitos com matriz argilosa arenosa ou areno-argilosa e siltitos (CPi) e outro grupo formado por arenitos e diamictitos arenosos (CPiar-membro arenoso). Uma falha (A/B) separa dois membros da formação Itararé. Na formação Tatuí distinguem-se siltitos arenosos e siltitos argilosos maciços (Ptt - membro inferior) e Siltitos argilosos maciços e argilitos (Ptts-membro superior). No nordeste do mapa, observa-se uma cobertura cenozóica representada por depósitos argilosos inconsolidados (Cc) (VIDAL-TORRADO, 1994) (Figura 9). A litologia dominante do talhão escolhido neste estudo corresponde aos arenitos e diamictitos da formação Itararé (CPiar-membro arenoso).

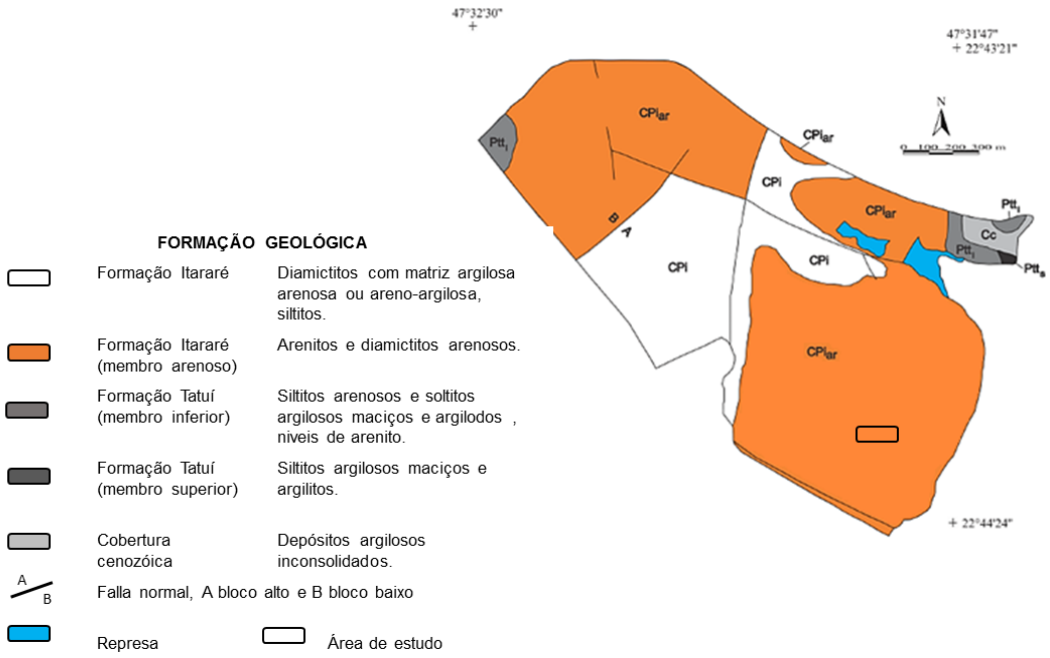


Figura 9 - Mapa da geologia da Estação Experimental de Tupi (adaptado de PINHEIRO et al., 1999)

3.1.3 Geomorfologia

A área localiza-se na zona média da bacia hidrográfica do Rio Tietê. A topografia da Zona do Médio Tietê é pouco acidentada, com desníveis locais que raramente ultrapassam os 200 metros, predominando colinas baixas, de formas suavizadas, separadas por vales jovens, sem planícies aluviais importantes, determinados pela intersecção dos perfis convexos das vertentes (PINHEIRO et al., 1999).

O relevo, na Estação Experimental de Tupi, é caracterizado por morrotes alongados e espigões e colinas amplas. Existem dois ribeirões, Tijuco Preto e Batistada, que ocorrem sobre as planícies aluviais caracterizadas pelos terrenos baixos e mais ou menos planos, sujeitos periodicamente a inundações (PINHEIRO et al., 1999) (Figura 10).

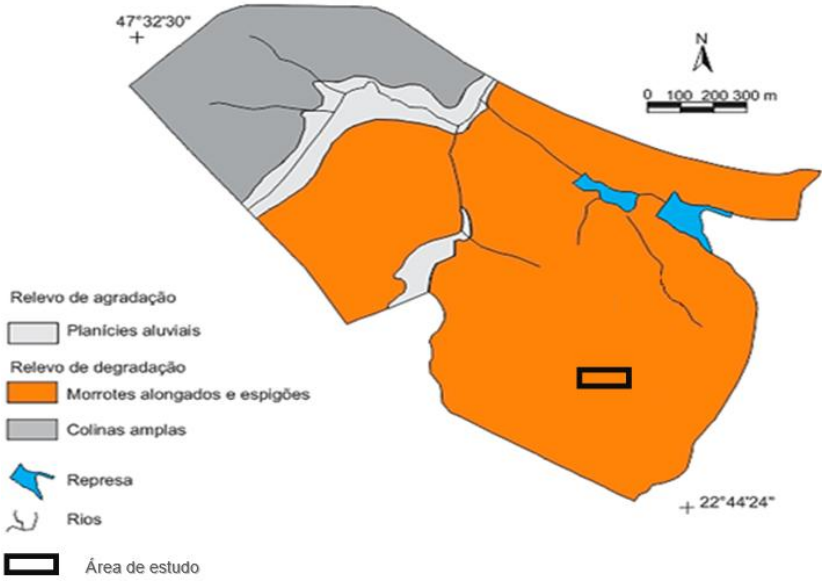


Figura 10 - Mapa geomorfológico da Estação Experimental de Tupi (adaptado de PINHEIRO et al., 1999).

A Estação experimental de Tupi se localiza entre as altitudes de 505 a 565 metros. As áreas de menor altitude encontram-se nas planícies aluviais dos ribeirões Tijuco Preto e Batistada, as quais apresentam altitudes inferiores a 505 metros. Os sectores mais elevados estão localizados principalmente ao leste e correspondem ao topo aplainado dos interflúvios principais (Figura 11). Estas áreas são interpretadas como um remanescente de superfície mais antiga do local.

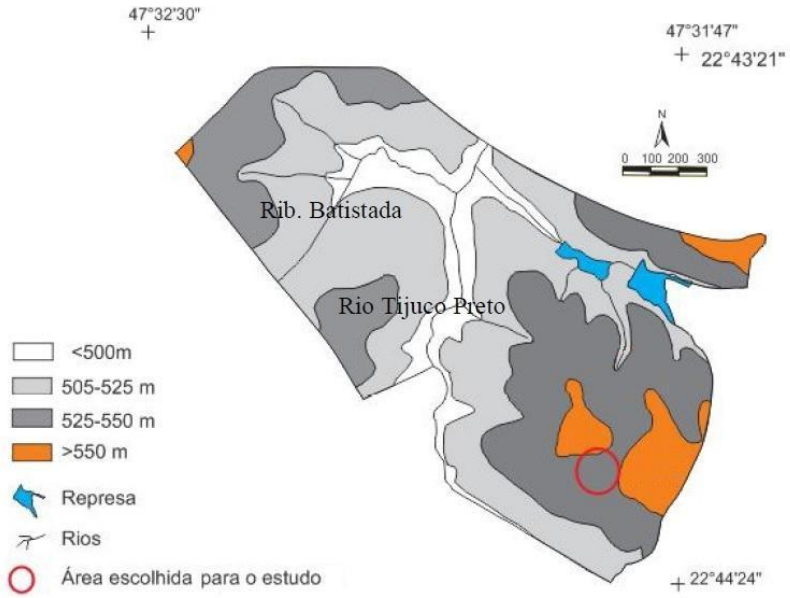


Figura 11 - Mapa de altimetria da Estação Experimental de Tupi (adaptado de PINHEIRO et al., 1999)

Predominam as declividades inferiores a 12%, que correspondem aos topos aplainados dos morrotes e colinas, e às planícies dos ribeirões Tijuco Preto e Batistada. As declividades entre 12 a 30% são encontradas principalmente ao leste do ribeirão Tijuco Preto, nas vertentes convexas dos morrotes (Figura 12). As declividades acima de 30% ocorrem, em geral, ao longo dos pequenos cursos d'água, onde os vales são mais encaixados (PINHEIRO et al., 1999) e tem maior ocorrência de processos erosivos. Nestas áreas a enculturação do relevo processa-se de forma acelerada, com a degradação das vertentes, aumento do volume d'água escoada na superfície, aumento da contribuição sólida e o aprofundamento dos talvegues. Cabe destacar problemas de erosão com ocorrência de várias voçorocas efêmeras provocados pelo escoamento superficial concentrado das águas pluviais (SILVA & PFEIFER, 1998), erosão em voçorocas permanentes e subsuperficial (BOVI, 2013).

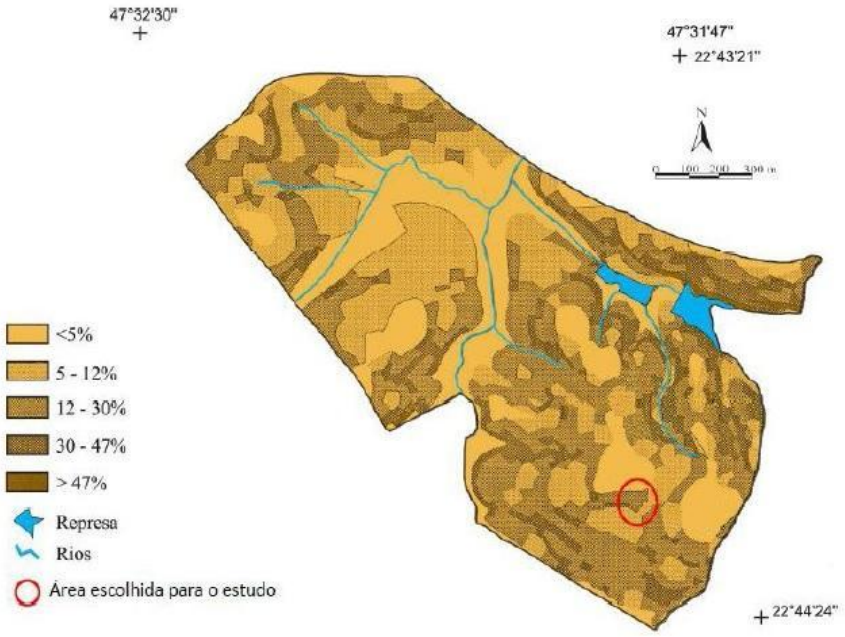


Figura 12- Mapa de declividade da Estação Experimental de Tupi (adaptado de PINHEIRO et al., 1999).

3.1.4 Solos

A área Estação Experimental de Tupi caracteriza-se por ter Argissolos, Neossolos, Gleissolos e Cambissolos (VIDAL TORRADO, 1994). Destaca-se na área a presença do Argissolo Vermelho Amarelo de textura arenosa/média desenvolvido das rochas do grupo Tubarão e Neossolos litólicos associados a outros tipos de rochas. A ocorrência de Gleissolos relaciona-se com as proximidades dos cursos de água especialmente do ribeirão Batistada. A área escolhida encontra-se sobre Argissolo Vermelho Amarelo de textura arenosa/media (Figura 13).

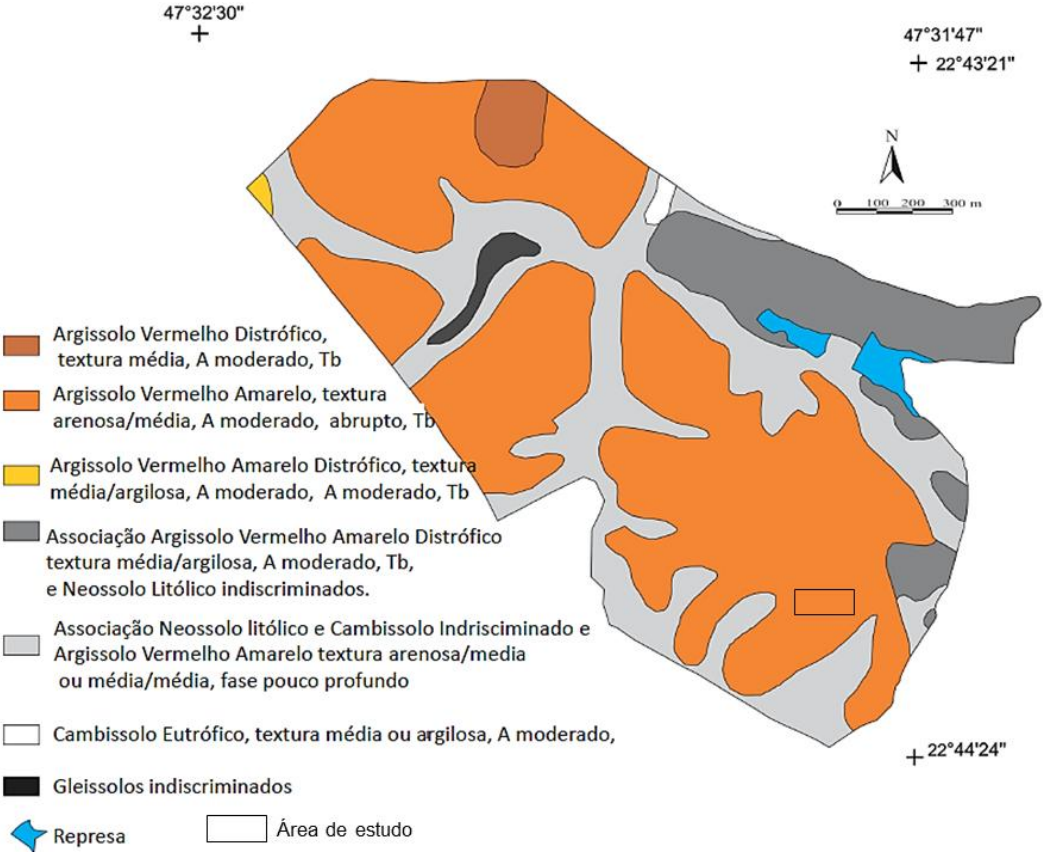


Figura 13 -Mapa pedológico da Estação Experimental de Tupi (adaptado de PINHEIRO et al., 1999).

Para mais detalhe do tipo do solo na área específica do estudo foram realizadas em dois perfis do talhão uma descrição morfológica do solo, análises químicas e físicas (Anexo 1) as quais classificaram o solo como Argissolo Amarelo distrófico típico segundo o Sistema Brasileiro de Classificação do Solo da EMBRAPA.

3.1.5 Vegetação

Em 1933, esta estação pertencia ao Instituto Agronômico de Campinas orientado à pesquisa de diferentes culturas agrícolas, levando os solos ao declínio de sua produtividade. Nos anos 60, instalou-se a estação florestal de caráter experimental. Por tanto, iniciaram-se os trabalhos de reflorestamento das áreas com espécies arbóreas tanto nativas como exóticas, destacando espécies do gênero *Pinus* e *Eucaliptus*, que atualmente ocupam 58 talhões. A comunidade vegetal nativa pertence ao tipo de Floresta Estacional Semidecidual. São formações de ambientes menos úmidos do que aqueles onde se desenvolve a floresta ombrófila densa, sendo consideradas como formações de transição entre a zona úmida costeira e o ambiente do cerrado. Esta formação vegetal é densa e apresenta um porte em

torno de 20 metros semelhante com o da floresta ombrófila densa, no entanto, apresenta, como característica importante, uma razoável perda de folhas no período da seca (EMBRAPA, 2015).

O projeto foi desenvolvido no talhão número 17 e segundo o levantamento florístico da Estação Experimental de Tupi feito por Pinheiro et al. (1999), a área foi reflorestada com as seguintes espécies: Guarantã uma espécie nativa da Mata Atlântica e diversas espécies de *Pinus*, todas foram plantadas no ano 1960. Porém, nos últimos anos com o abandono desta área experimental observa-se o processo de regeneração natural resultando na presença de outras espécies nativas, entre elas o guapuruvu (*Schizolobium parahyba)* que já foi usada em estudos dendrogeomorfológicos (BOVI, 2013). Um fator importante para a escolha deste local é a presença de árvores do gênero *Pinus*, que têm sido largamente usada em estudos dendrogeomorfológicos.

3.2 Seleção das espécies e levantamento topográfico

A aplicação dos métodos dendrogeomorfológicos para o estudo dos processos erosivos requer uma abordagem multidisciplinar, incluindo técnicas geomorfológicas, ecológicas e topográficas, podendo ser ligadas aos procedimentos de medição de erosão tradicionais como aos procedimentos hidrológicos (Ballesteros *et al*., 2012).

A primeira etapa do estudo dendrogeomorfológico foi a seleção e identificação da posição geográfica (coordenadas geográficas) dos indivíduos arbóreos mais adequados. Foram selecionados indivíduos que apresentavam raízes expostas por processos erosivos e raízes enterradas (não afetadas pelo processo erosivo). Também foram selecionadas árvores testemunhas que não apresentaram nenhuma das raízes expostas, portanto, não afetadas pela erosão (Figura 14), com a finalidade de poder comparar os padrões crescimento dos caules e das raízes entre as árvores influenciadas pela erosão e as não influenciadas. Somado a isto, e com a finalidade de compreender a distribuição das feições erosivas presentes na área de estudo, caracterizar o relevo e a posição geográfica das árvores foi realizado um levantamento topográfico detalhado utilizando-se como ferramenta uma estação total (Leica, TS06). Destaca-se a importância desta etapa, pois a avaliação conjunta da posição das árvores presentes no entorno das voçorocas com os resultados dos anos de exposição das raízes ajuda a entender a dinâmica dos processos erosivos da área. O processamento dos dados topográficos e produção do material cartográfico foi realizado com o programa ArcGIS 10.2 (Figura 14).

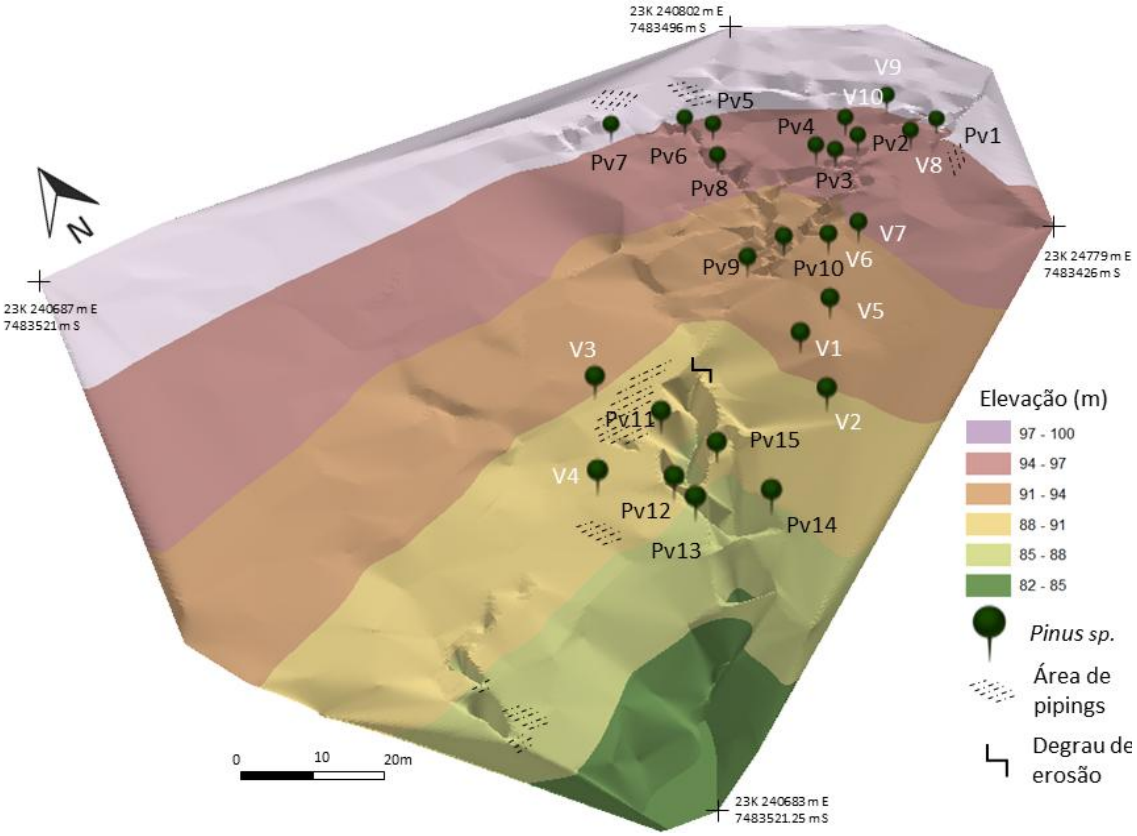


Figura 14 - Mapa topográfico da área de estudo com as árvores. Pv indica árvores com erosão e V árvores testemunhas

Na Figura 14 pode ser observada a distribuição ao longo da voçoroca das árvores testemunhas e árvores afetadas pela erosão. Na voçoroca distinguem-se duas partes, uma área superior e outra inferior. A parte superior da voçoroca caracteriza-se por ser menos profunda e estar formada por vários braços. Na transição entre a parte superior e a inferior a voçoroca se torna menos profunda e se observam processos de sedimentação dentro dela. A parte inferior da voçoroca caracteriza-se por ser mais profunda, iniciando-se por um degrau de erosão, e pela maior ocorrência de áreas de concentração de *pipings.* A área de estudo tem uma diferença de altitude de 20 metros.

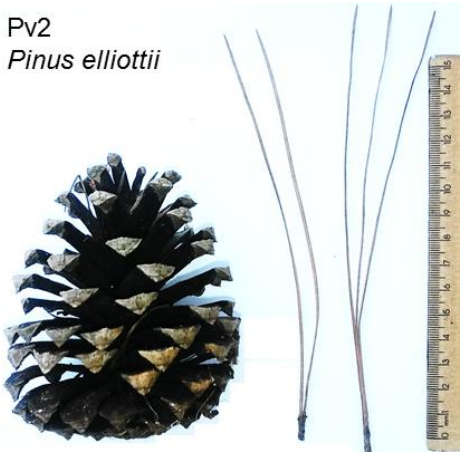
3.3 Identificação botânica e caracterização dos indivíduos.

No talhão 17 foram encontradas diversas espécies de pinheiro o que fez necessário a identificação de cada uma das árvores estudadas (Tabela 1). Esta identificação foi realizada com ajuda de chaves de identificação botânica (MATTOS, s/d; VIDAKOVIC, 1991) e com ajuda dos funcionários da própria estação experimental de Tupi. Para isso, foi realizada uma primeira identificação visual em campo da copa e tronco dos indivíduos e também foram coletadas amostras biológicas das folhas e das pinhas. No laboratório usaram-se as chaves

para identificar cada uma das árvores, levando em conta o número de acículas, tamanho e forma da folha, e a morfologia e tamanho das pinhas.

Tabela 1 - Determinação da espécie de cada árvore amostrada (esquerda) e material biológico coletado para a identificação da espécie (direita).

Árvore com erosão	**Especie**	**Árvore testemunha**	**Especie**
Pv 1	*P. taeda*	V1	*P. elliottii*
Pv 2	*P.elliottii*	V2	*P.elliottii*
Pv 3	*P.elliottii*	V3	*P.elliottii*
Pv 4	*P.elliottii*	V4	*P.elliottii*
Pv 5	*P.elliottii*	V5	*P.oocarpa*
Pv 6	*P.oocarpa*	V6	*P.elliottii*
Pv 7	*P.elliottii*	V7	*P.elliottii*
Pv 8	*P.taeda*	V8	*P.elliottii*
Pv 9	*P.elliottii*	V9	*P.elliottii*
Pv 10	*P. taeda*	V10	*P.elliottii*
Pv 11	*P.elliottii*		
Pv 12	*P.elliottii*		
Pv 13	*P.elliottii*		
Pv 14	*P.elliottii*		
Pv 15	*P.elliottii*		



P. elliottii é uma árvore alta de 30 metros de altura e 90 cm de diâmetro cuja copa diminui de tamanho com o crescimento. Uma das características mais peculiares desta espécie é que possui uma casca grossa que se desprende em placas grandes, finas e irregulares. As folhas estão compostas por 2 ou 3 acículas com 15-25 cm de comprimento e serrilhadas. As pinhas são pedunculadas, grandes (com 10 cm de comprimento), ovado-oblongas, brilhantes, umbo rombiforme, quilhas salientes e cúspide mucronada (MATTOS, s/d; VIDAKOVIC, 1991). A sua distribuição geográfica original é o sudeste dos Estados Unidos, especialmente a Florida. É uma das espécies mais cultivadas no Brasil devido a que apresenta um crescimento rápido, vigoroso e uniforme (MATTOS, s/d) e a sua produção é usada para madeira e resina, principalmente. Contudo, a invasão de *P. elliottii* é uma das mais graves ameaças para a vegetação nativa do cerrado no Estado de São Paulo (DE ABREU; DURIGAN, 2011).

Pinus taeda é uma árvore que pode atingir alturas maiores a 30 metros e diâmetro de tronco de 1 m. A copa é ligeiramente arredondada e densa. As folhas são verdes claras e formadas por 3 acículas. Cones subterminais ou laterais, sésseis, muito resistentes, ovado-oblongos com 6-10 cm de comprimento, quilhas salientes, cúspide e espinho alongado (MATTOS, s/d; VIDAKOVIC, 1991). Este pinheiro é oriundo do Sudeste dos Estados

Unidos, sendo uma das espécies madeireiras mais importantes do Sudeste dos EUA devido a seu alto preço de mercado, boas características de crescimento e propriedades da madeira. Além disso, pode-se extrair resina embora a qualidade e quantidade sejam menores às produzidas por *P. elliottii*. A distribuição altitudinal se estende desde próximo à costa até 250 metros de altitude, raramente supera os 600m. Aparece em solos com mais umidade, mas também em solos secos, portanto, é favorável para o seu cultivo em áreas mais quentes (VIDAKOVIC, 1991).

Pinus Oocarpa árvore de aproximadamente 20 metros de altura, podendo atingir alturas maiores, e diâmetro do tronco de 40-70 cm. A copa é arredondada e a casca marrom escura com fissuras que descasca em placas irregulares. As folhas estão formadas por 5 acículas, raramente 4 ou 6, com 15-30 cm de comprimento, brilhantes, verdes claras, de secção triangular e bordas finamente serrilhadas. As pinhas são ovoides e pedunculadas com 5-7 cm de comprimento, normalmente encontra-se em grupos de 3, quilha pouco saliente e com pequeno espinho (MATTOS, s/d; VIDAKOVIC, 1991). A sua madeira é dura e resistente e de alta qualidade e produz resina em quantidade viável para a extração comercial. A madeira tem densidade de 0,7 g/cm^3. *P. oocarpa* está entre os denominados pinheiros tropicais mais difundidos pelo tropico, localizando-se em México, Guatemala, Honduras e Nicarágua em altitudes de 800 até 2000 metros. O seu habitat natural varia desde clima temperado-seco, até subtropical úmido.

3.4 Metodologia de análise do caule e da raiz das árvores

Em seguida serão apresentadas as metodologias diferenciando entre os métodos usados na análise do caule e da raiz.

3.4.1 Caule

3.4.1.1 Coleta das amostras do caule.

As amostras do caule para o estudo dos anéis de crescimento e estimativa da idade foram coletadas utilizando-se um método não destrutivo. Para esta finalidade, foi utilizado um trado de aço denominada sonda Pressler (LISI et al., 2008). Este trado retira um cilindro de madeira de 5-10 mm de diâmetro e de até 40 cm de comprimento através de uma incisão no tronco. De cada árvore retirou-se duas amostras desde a medula até a casca, a qual está ligada ao último anel de crescimento que representa o ano atual da coleta (único ano conhecido na série cronológica dos anéis). É por isso que foi preciso prestar atenção para que as amostras do caule fossem extraídas com a casca. As amostras foram retiradas a uma altura do tronco, a

partir da superfície do solo, de, aproximadamente, 100 cm. O orifício realizado pela sonda foi coberto com uma cavilha de madeira de 8 mm, com o objetivo de diminuir a vulnerabilidade da árvore de ser atacada por parasitos e provocar doenças. As amostras foram transportadas em suportes de plástico até o laboratório de Anatomia da Madeira, Dendrocronologia e Densitometria de Raio X em madeiras, do departamento de Ciências Florestais da ESALQ-USP. Em seguida, as amostras foram coladas em suportes de madeira com as fibras dispostas em sentido vertical e lixadas (lixas de granulometria de 80 a 1200) para melhor observação dos anéis do lenho (Figura 15).

3.4.1.2 Caracterização dos anéis de crescimento: dendrocronologia.

Os anéis de crescimento das árvores amostradas foram identificados mediante o uso de um microscópico estereoscópico. Após a demarcação dos anéis e contagem dos anéis, cada amostra foi digitalizada com um scanner de alta resolução HP Scanjet 3800, obtendo-se imagens de 1200 dpi com 48 bits de cor. A largura de cada anel foi medida nas imagens digitalizadas usando-se o programa Image-Pro Plus previamente calibrado com uma escala (precisão 0.01mm). As medições de cada anel foram feitas paralelas à disposição das traqueídes. Este procedimento foi realizado nas amostras do caule coletadas do tronco das árvores e, também, com as fatias das raízes (Figura 15).

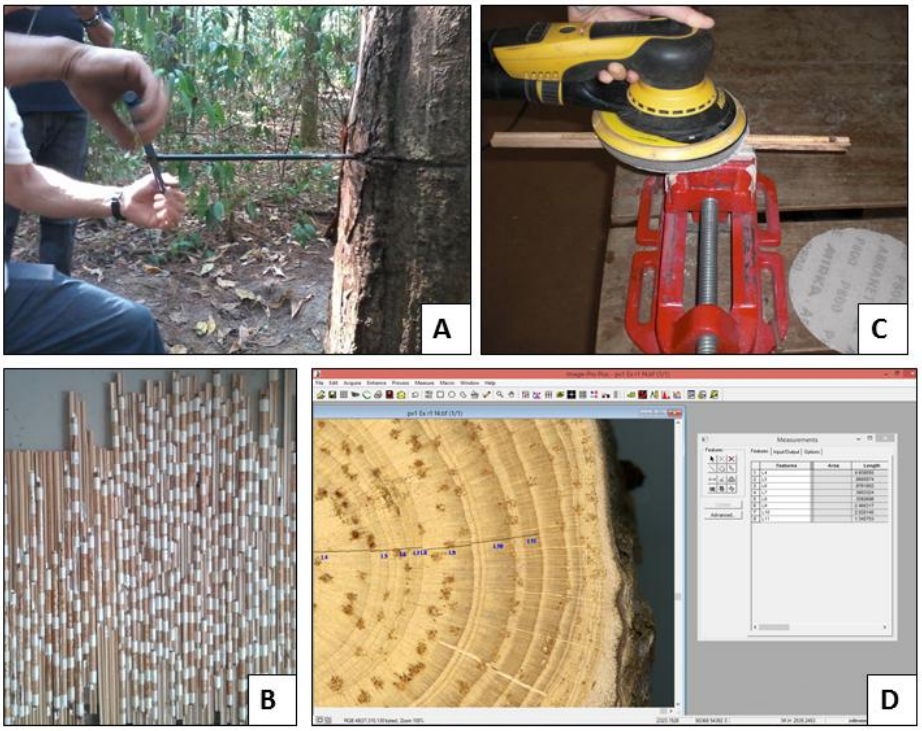


Figura 15 – a) Extração de amostras com a sonda Presler, b) amostras coladas em suportes de madeira, c) preparo da amostra na lixa e d) medição da largura dos anéis

A partir das medições da largura obtidas com o programa de imagens obtiveram-se as series de crescimento dos raios de cada árvore. Estes dados foram processados em uma planilha de Excel corrigindo e sincronizando, na sua primeira etapa, os possíveis erros das medições pela ausência de anéis ou presença de anéis falsos. A segunda etapa da correção dos erros e controle da qualidade dos anéis foi feita com ajuda do programa COFECHA (HOLMES; ADAMS; FRITTS, 1986). Este programa permite a sincronização das series de cada amostra para a obtenção de uma serie máster (serie média). O programa fornece a correlação (Pearson) de cada série com a série máster, observando aqueles segmentos que têm uma correlação inferior ao nível crítico. Além disso, indica os anos com problemas, aqueles inferiores ao nível crítico de correlação ou aqueles que tem anéis em excesso ou ausentes.

Após o uso de COFECHA realizou-se a padronização do crescimento das árvores. Esta análise dendrocronológica do lenho baseou-se em conceitos que considera que o crescimento das plantas pode ser decomposto em um agregado linear de fatores ambientais que podem afetar o modelo de crescimento da árvore com o tempo (COOK; KAIRIŪKŠTIS, 1992). Isso implica que o crescimento dos anéis para qualquer ano está relacionado a diversos fatores como a tendência de crescimento, fatores climáticos, eventos intrínsecos e extrínsecos a floresta, os processos aleatórios (ruídos), etc. Os fatores listados acima podem ser expressos pela equação:

$$C_{At} = A_t + B_t + C_t + D_t + E_t$$

Onde:

C_{At}, é o crescimento de anel em um ano (t) qualquer;

A_t, tendência de crescimento com a idade da árvore;

B_t, o sinal climático;

C_t, processos de distúrbios causados por perturbações endógenas de ação individual;

D_t, processos de distúrbios causados por perturbações exógenas comuns a população;

E_t, processos aleatórios (ou ruídos).

Para que as tendências indesejáveis ao foco da pesquisa fossem eliminadas, foram aplicadas nas séries temporais da espessura dos anéis de crescimento funções de ajuste com o intuito de obter a melhor curva que representasse as tendências associadas ao ritmo de crescimento de cada série. Assim é efetuada a padronização, pela qual se obtém o índice da espessura dos anéis de crescimento das árvores. O processo de padronização das séries que melhor foram correlacionadas no COFECHA foram realizadas por meio do software ARSTAN. Ajustou-se as séries temporais por meio de uma spline suavizada (50% ao 0,67).

A escolha dessa função se deu por esta se ajustar melhor as características particulares de crescimento de cada amostra. Finalmente, com o ajuste de cada serie à uma função, obteve-se duas séries cronológicas finais que representam o crescimento de todas as árvores afetadas pela erosão e as testemunhas. A cronologia final permitiu comparar o crescimento das árvores com os dados climáticos do Posto Agrometeorológico da ESALQ.

3.4.2 Raiz

3.4.2.1 Coleta das amostras da raiz.

Previamente à coleta das amostras da raiz, foi realizada uma descrição detalhada das características morfológicas e espaciais da posição da raiz. Para isto, foi necessário medir a distância entre a seção da raiz a ser amostrada e o caule, e a distância vertical entre a parte superior e inferior da raiz e a superfície do solo e, também, com o fundo da voçoroca (Bodoque *et al*., 2005). Com as medições detalhadas, realizaram-se os gráficos mostrando as posições das raízes no perfil da voçoroca (Figura 16).

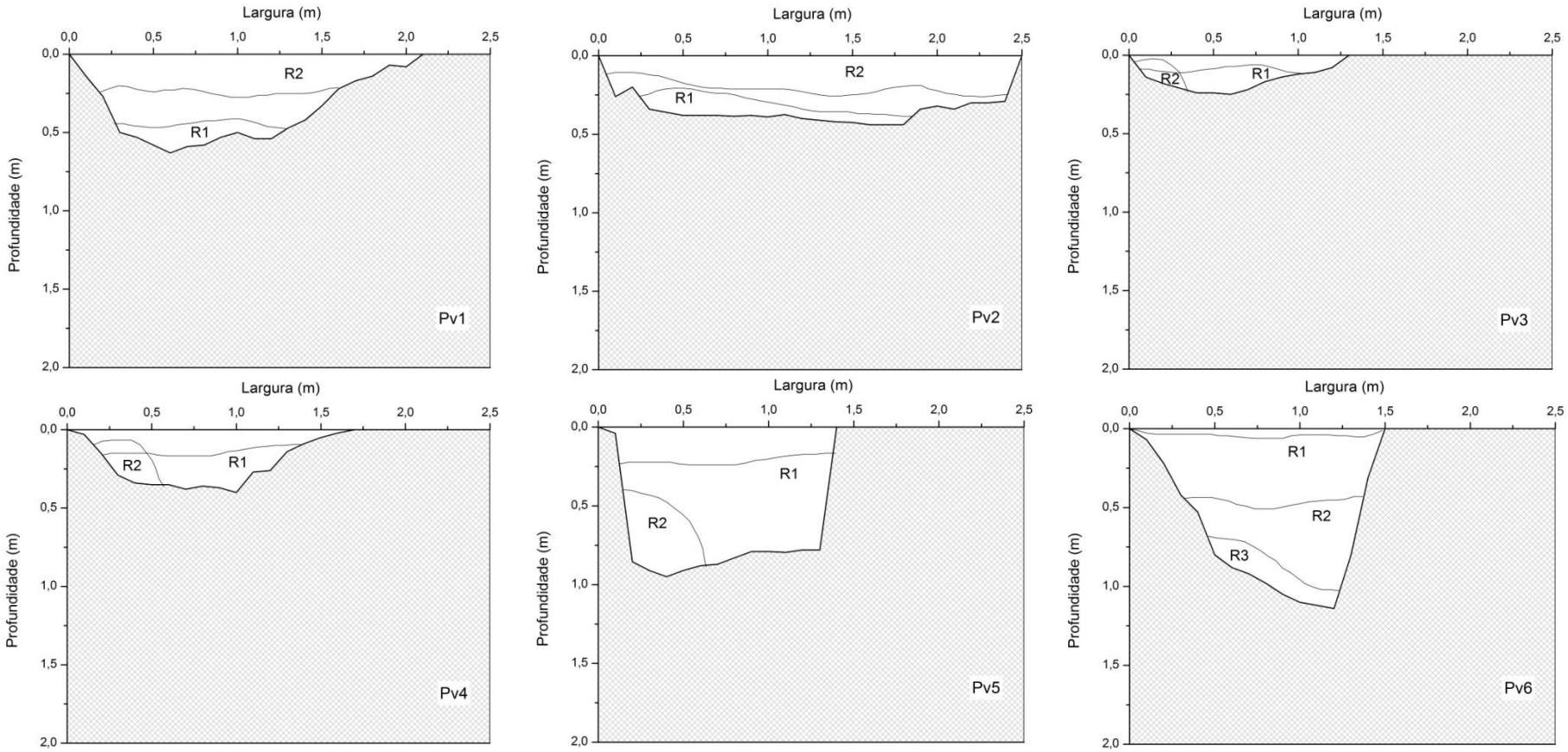


Figura 16a - Gráficos esquemáticos da localização das raízes de cada árvore junto no perfil topográfico da voçoroca. Pv e R junto com um número indica o nome da árvore ou da raiz respectivamente.

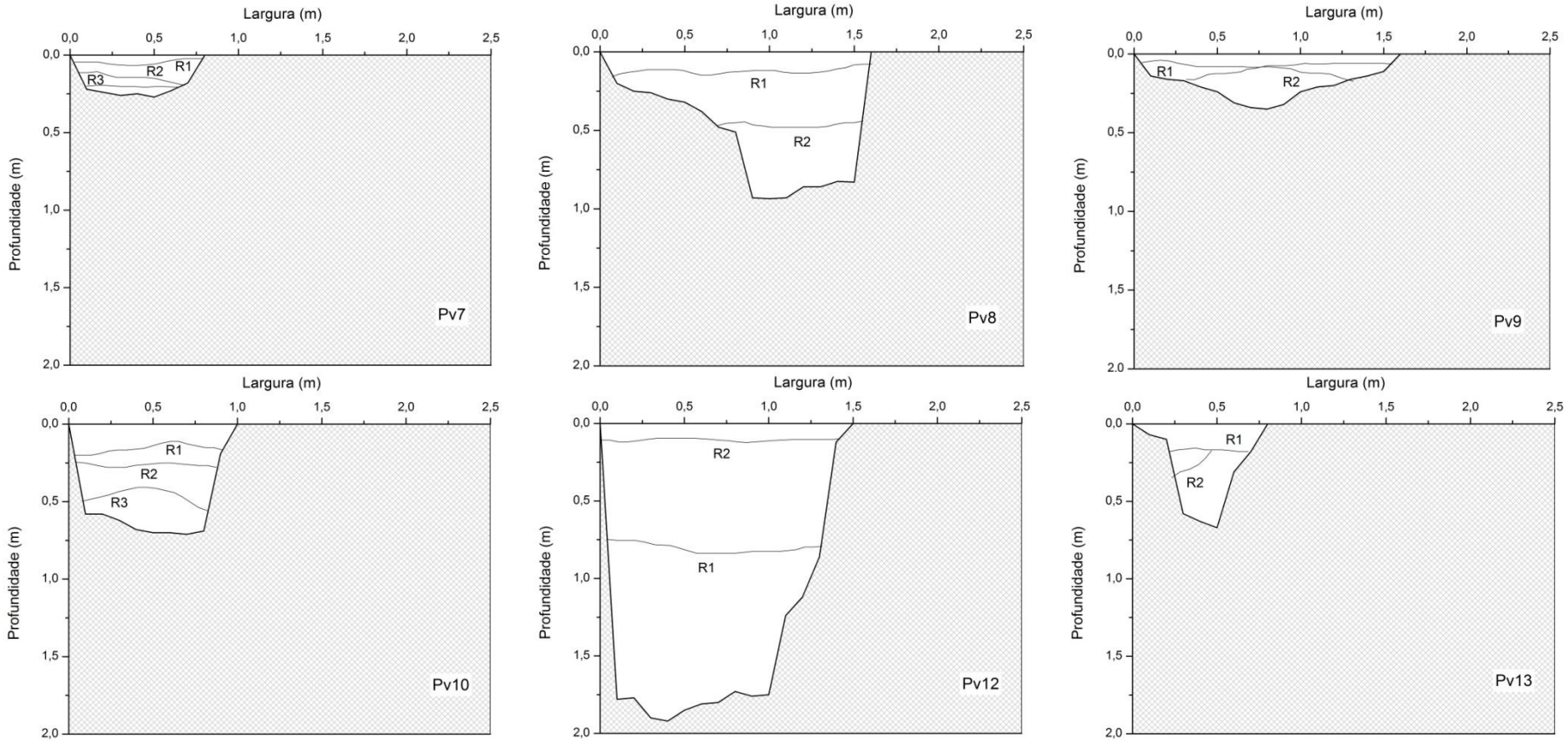


Figura 16b - Gráficos esquemáticos da localização das raízes de cada árvore no perfil topográfico da voçoroca. Pv e R junto com um número indica o nome da árvore ou da raiz respectivamente.

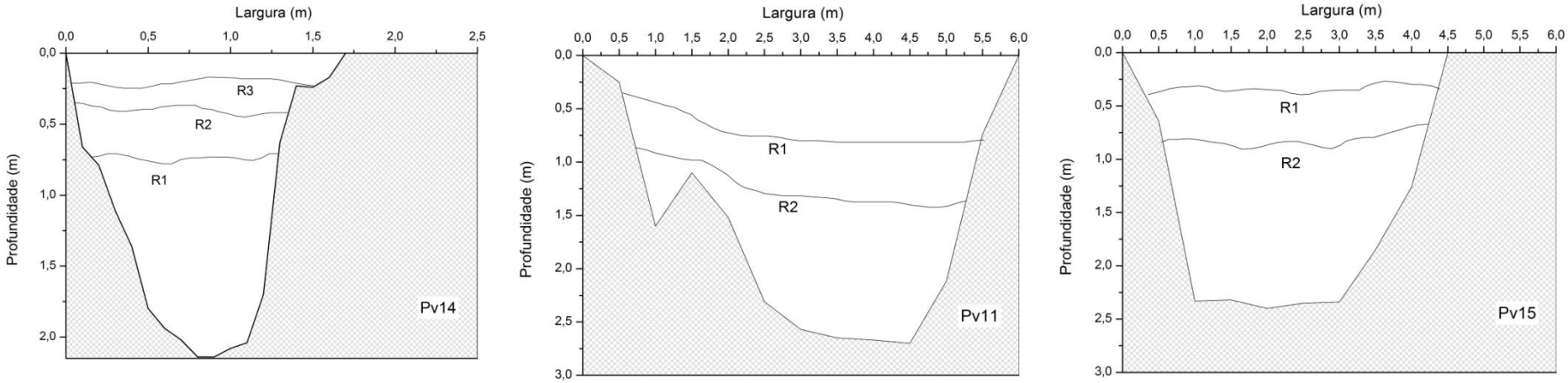


Figura 16c - Gráficos esquemáticos da localização das raízes de cada árvore no perfil topográfico da voçoroca. Pv e R junto com um número indica o nome da árvore ou da raiz respectivamente.

Diferenciou-se entre voçoroca efêmera e voçoroca quando a profundidade da mesma superava os 50 cm. Portanto, classificou-se cada um dos perfis onde as raízes estavam localizadas com o intuito de entender melhor a influência da erosão nas raízes. As raízes das árvores Pv1, Pv5, Pv8, Pv10, Pv12, Pv13 e Pv14 foram localizadas em voçorocas, destacando as raízes das árvores Pv11 e Pv15 onde a voçoroca era especialmente grande. As raízes das árvores Pv2, Pv3, Pv4 e Pv7 foram encontradas em voçorocas efêmeras (Figura 16). As raízes de Pv1 localizam-se na transição entre a parte rasa da voçoroca (voçoroca efêmera) e a parte profunda da voçoroca (voçoroca).

As amostras de raízes expostas foram coletadas utilizando-se uma motosserra de madeira. As raízes enterradas foram desenterradas utilizando-se uma pá e enxada, e cortadas, também, com motosserra. (Figura 17). As raízes foram retiradas a uma distância de um metro do caule, porque para distancias inferiores, as seções amostradas podem sofrer influência do crescimento do caule (GÄRTNER, 2007; HITZ et al., 2008a). No momento da coleta, foi identificada a parte superior e inferior das raízes e a direção do fluxo da água na voçoroca.

Cada raiz coletada foi levada para o laboratório e cortada em fatias (Figura 17). As fatias foram selecionadas segundo critérios anatômicos interessantes como a presença de cicatrizes que podiam marcar o início do primeiro anel exposto, no entanto, evitando as áreas com muita resina que pudesse dificultar a observação dos anéis. Após a seleção, as fatias foram lixadas e polidas gradualmente com lixas de diferentes granulometrias, este processo é necessário para facilitar a observação dos anéis de crescimento (GÄRTNER; SCHWEINGRUBER; DIKAU, 2001). As fatias tinham uma largura de 4 cm, sendo cada uma delas seccionada para diferentes análises; sendo o primeiro centímetro para a identificação de anéis de crescimento. Das mesmas amostras foram extraídas, da superfície transversal, lâminas de 2 mm de espessura para a determinação da densidade do lenho mediante raio X.

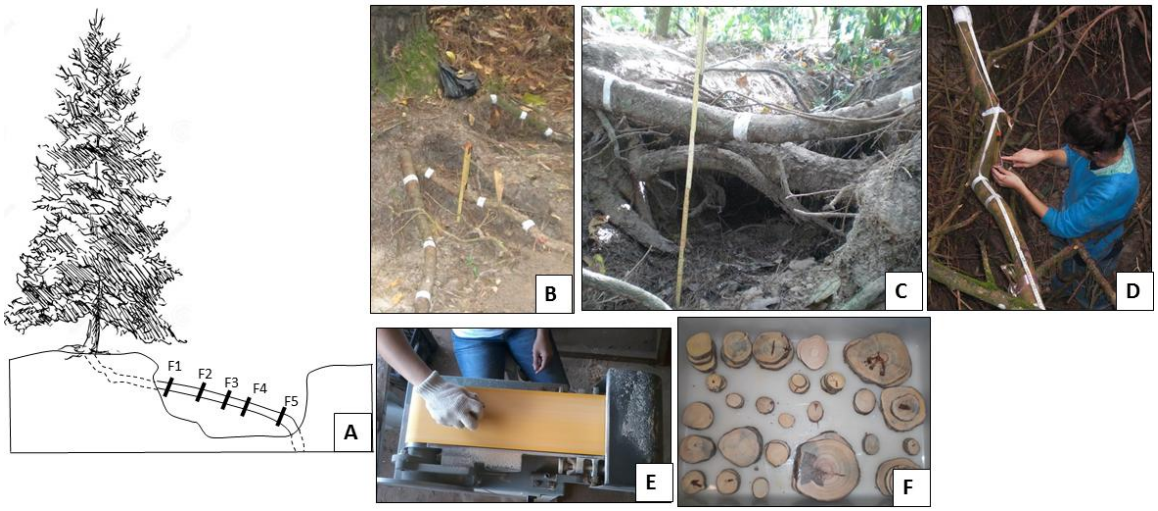


Figura 17 - Procedimento de documentação, amostragem e processamento de raízes expostas. a) Esquema de corte de raízes e seleção de amostras e fatias, b) e c) exemplo de raízes no campo, d) Medida da altura da raiz com o fundo da voçoroca, e) preparação das fatias na lixa e f) amostras preparadas para a análise

A seleção dos indivíduos teve por resultado: quinze árvores de *Pinus* com influência da erosão e dez árvores testemunhas (Tabela 2). Dos indivíduos selecionados afetados pela erosão foram coletadas amostras do caule e das raízes (expostas e não expostas), por outro lado, das árvores testemunhas foram coletadas caule e raízes enterradas.

Tabela 2 – Lista das raízes e fatias estudas

Árvore com erosão	Raízes enterradas		Raízes expostas		Árvore testemunha	Raízes enterradas	
	Nº raízes	Fatias estudadas	Nº raízes	Fatias estudadas		Nº raízes	Fatias estudadas
Pv1	1	2	2	4	V1	1	2
Pv2	1	2	2	5	V2	2	3
Pv3	1	2	1	2	V3	2	3
Pv4	2	3	1	2	V4	2	3
Pv5	1	1	2	4	V5	-	-
Pv6	1	2	3	6	V6	2	4
Pv7	1	2	3	6	V7	2	3
Pv8	-	-	2	4	V8	2	3
Pv9	1	2	2	4	V9	-	-
Pv10	2	4	2	4	V10	2	3
Pv11	2	1	1	1			
Pv12	2	4	2	6			
Pv13	2	2	2	4			
Pv14	2	3	3	6			
Pv15	1	2	2	4			
Total	21	32	31	65	Total	15	23

Finalmente, foram estudadas 32 fatias de 20 raízes enterradas, 65 fatias de 31 raízes expostas e 23 fatias de 15 raízes testemunhas, portanto, um total de 67 raízes e 120 fatias (Tabela 2). Às vezes, o mal estado das raízes obrigou descartá-las. As amostras foram marcadas: primeiramente o número da árvore junto com Pv ou V indicado árvore com erosão e testemunha, respetivamente; seguido de EX ou ET identificando se é raiz exposta ou enterrada, depois r com o número de raiz e f com o número da fatia da raiz. Por exemplo: Pv1 EX r1 f1.

3.4.2.2 Caracterização dos anéis de crescimento: dendrocronologia.

Os anéis de crescimento foram identificados mediante o uso de um microscópico estereoscópico. Nas fatias das raízes foram marcados três ráios com lápis preferentemente nas áreas mais adequadas. Para esta escolha foram considerados parâmetros como a presença de madeira de reação, excentricidade dos anéis de crescimento, cicatrizes e/ou nós de madeira. Os anéis foram identificados prestando grande atenção na aparição de anéis falsos. Segundo bibliografia, os anéis falsos são reconhecidos visualmente pela diferença de padrão da cor, tamanho e parede das traqueídes (Figura 4). Além disto, para a identificação dos anéis falsos cada anel foi seguido ao longo de toda a secção transversal da amostra para garantir a sua continuidade (HOWELL; MATHIASEN, 2004). Deve-se destacar que, devido ao lenho de reação da madeira associado à excentricidade do crescimento, algumas partes apresentavam dificuldade de identificação, sendo que o anel era claramente visível num dos raios e nos outros desapareciam. Mesmo assim, estes eram contabilizados. Isto implica que o câmbio concentrou a sua atividade num segmento da raiz para reorientar o crescimento dela na procura de melhores condições.

Após a demarcação dos anéis, cada amostra foi digitalizada com um scanner de alta resolução (1200 dpi). Em seguida, ao igual que as amostras do caule, a largura de cada anel foi medida (precisão 0,01mm) com o programa Image-Pro Plus. Nos raios que apresentavam anéis muito pequenos e difíceis de medir, mas eram observados nos outros raios, foi estabelecido um valor na medição de 0,01mm (HOWELL; MATHIASEN, 2004). Com este mesmo método foram feitas as medições da largura do lenho tardio para a obtenção dos valores da porcentagem do lenho tardio em cada anel de crescimento.

O controle e padronização das series das raízes não foram realizados da mesma maneira que o caule. A elevada excentricidade das raízes torna difícil a correlação de todas as séries com o uso do COFECHA. Nos estudos dendrogeomorfológicos não existem estudos que tenham conseguido a datação cruzada entre as raízes (BODOQUE et al., 2005, 2011b;

CORONA et al., 2011; HITZ et al., 2008a; STOFFEL et al., 2013a), a exceção do trabalho desenvolvido por BOVI (2013). Portanto, como alternativa à correlação cruzada com COFECHA, o controle da datação dos anéis de crescimento das raízes foi feito no Excel. As séries dos três raios de uma fatia eram sincronizadas com as séries da outra fatia da mesma raiz. Para isso foram identificados os anéis característicos que apareciam nas duas fatias (Figura 18).

O uso de fatias da mesma raiz garante a qualidade dos dados e permite a identificação de anéis falsos ou anéis ausentes. No entanto, com as séries dos três raios criava-se uma série média que era comparada com as séries médias das fatias das outras raízes expostas da mesma árvore, ou seja, o crescimento médio de cada fatia foi comparado com as outras fatias da mesma árvore. Para maior confiança, as séries das raízes expostas eram comparadas com as séries das raízes enterradas da mesma árvore. Finalmente, mediante uma matriz de correlação (coeficiente de Pearson) correlacionou-se todas as séries de uma árvore. Desta forma, reduziram-se os erros da datação das raízes.

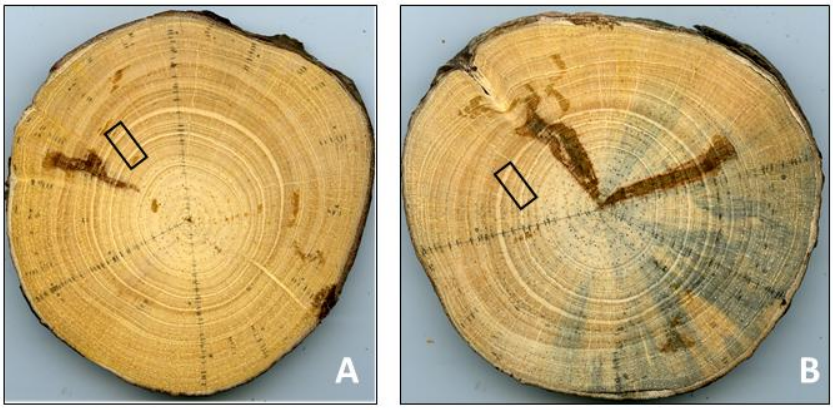


Figura 18 - a) e b) amostras da mesma árvore destacando anéis característicos que ajudaram a correlacionar as duas amostras e identificar anéis falsos ou ausentes entre elas

3.5 Determinação da densidade do lenho mediante raios X

As amostras para a determinação da densidade do lenho mediante raios X foram extraídas da parte inferior das fatias das raízes usadas para a cronologia. Estas amostras foram cortadas com uma serra de disco de aço de 100 pontas, obtendo discos de toda a seção transversal da raiz de 2 mm de espessura. Para esta analise foram utilizadas as amostras das raízes das arvores testemunhas e das árvores com erosão, tanto enterradas quanto expostas.

Após o corte, foram mantidas durante 24 horas em uma câmara de climatização até atingir a umidade adequada para a análise. Em seguida, foram transferidas para o equipamento de Raio X digital Faxitrom X-Ray LLC (modelo LX- 60 Laboratory Radiography System). As amostras foram expostas a uma potência de 30KV durante 19 segundos com um laser (informação do laser: potência 2mW e comprimento de onda 650 nm). O equipamento dispõe de bandejas localizadas em diferentes alturas as quais se adaptam ao tamanho das amostras. Foram analisadas três alturas diferentes: amostras maiores foram colocadas a 83 cm da fonte emissora, amostras de tamanho médio a 55,4 cm e amostras menores a 41,7 cm. Foi necessário colocar uma escala de celulose nas amostras. Obtiveram-se as imagens de cada uma das amostras em formato DCM e TIFF. O arquivo DCM foi levado para o software ImageJ que permitiu obter os dados de densidade a partir dos diferentes níveis de cinza das imagens.

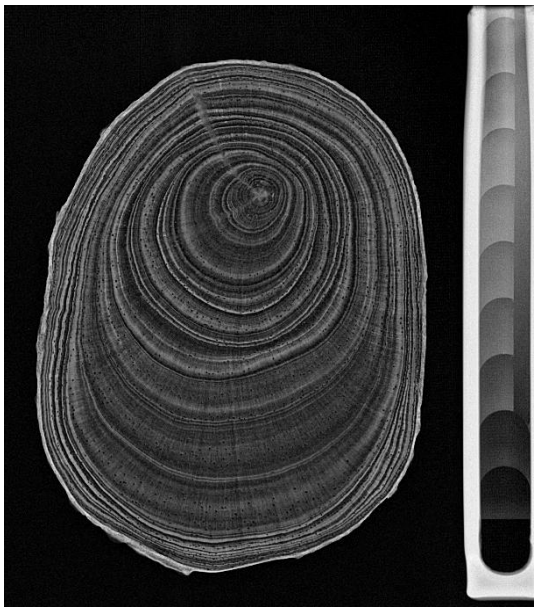


Figura 19 - Imagem de raio X com escala da amostra Pv6 Ex r2 f4.

3.6 **Datação dos processos erosivos e cálculo da taxa de erosão.**

Todas as raízes analisadas são anteriores ao processo erosivo, já que elas não se desenvolvem fora do solo. Portanto, elas são testemunhas destes processos e podem manifestar ou não mudanças que ajudem a conhecer a dinâmica erosiva. A datação dos processos erosivos foi determinada com ajuda da observação de cicatrizes e características anatômicas das raízes expostas. Os crescimentos excêntricos dos anéis é a mudança comumente mais visível após a exposição da raiz (STOFFEL et al., 2013a). Outro indício de

exposição da raiz são as cicatrizes facilmente localizadas pelo tecido caloso no registro dos anéis das árvores (BALLESTEROS et al., 2010). Por outro lado, a análise anatômica é essencial por causa da dificuldade de diferenciar os anéis de crescimento das raízes (GÄRTNER; SCHWEINGRUBER; DIKAU, 2001). Na datação da erosão é fundamental datar o primeiro ano da exposição da raiz.

A maioria das equações empíricas usadas para estimar as taxas de erosão estão relacionadas com a diferença entre o volume do solo perdido dividido pelo tempo definido pela exposição das raízes (BALLESTEROS-CÁNOVAS et al., 2013a). O estudo estimou a taxa de erosão mediante a equação de GÄRTNER (2007). Esta equação é representada pela altura do solo perdido dividido pelo número de anos da exposição da raiz. Porém, CORONA et al. (2011) demonstraram que as respostas anatômicas se produzem centímetros antes da exposição da raiz. Portanto, a taxa média anual será subestimada se este conceito ou viés (Ɛ) não for considerado. Desta forma, a equação para calcular a taxa de erosão foi (BODOQUE et al., 2011b):

$$\mathrm{Er} = \frac{\mathrm{Ex} + \varepsilon}{\mathrm{NRex}}$$

Onde:
Er: taxa de erosão média (mm/ano).
Ex: altura entre a raiz e o fundo da voçoroca (mm)
Ɛ: viés.
NRex: número de anéis de crescimento anuais da raiz desde sua exposição.

Esta equação é usada para determinar a erosão laminar, e alguns autores a usam para calcular a erosão laminar dentro de voçorocas. Porém, para o estudo da erosão em voçorocas existe outro método empregado por diversos autores (MALIK, 2008; ŠILHÁN, 2012), que neste estudo será denominado Taxa de Erosão Horizontal (TEH). A TEH é calculada para cada trecho de voçoroca, considerando a distância entre duas raízes vizinhas dividido pelo tempo entre a exposição de cada raiz vizinha (TEH=distância entre raízes/diferença no ano de exposição das raízes). Para o uso deste método, somente foram consideradas as raízes que atravessam totalmente a voçoroca, transversal ou diagonalmente, e as raízes posicionadas mais próximas à superfície do solo.

A determinação do primeiro anel da exposição através das mudanças anatômicas foi realizada pela análise da: 1) largura do anel, 2) a porcentagem do lenho tardio, 3) densidade do lenho e 4) índice de excentricidade. Portanto, foram analisados todos estes parâmetros para

poder datar o primeiro ano da exposição, determinado por alguma mudança abrupta destes parâmetros, e quantificar os anos de exposição para calcular a taxa de erosão ou conhecer a dinâmica do processo erosivo da área de estudo.

3.7 Determinação do crescimento excêntrico das raízes

Grande parte da bibliográfica sobre de índices de excentricidade são indicados para o cálculo da excentricidade do caule das árvores (BRAAM; WEISS; BURROUGH, 1987; MALIK; WISTUBA, 2012; ROZAS, 2003; SCHWEINGRUBER, 1996; ŠILHÁN; STOFFEL, 2015), porém, neste estudo foi aplicado a melhor adaptação dos índices para o cálculo da excentricidade da raiz. A excentricidade dos anéis de crescimento das raízes foi determinada com um índice baseado em ROZAS et al. (2003), sendo:

$$E = \left(1 - \frac{\mathrm{m}}{\mathrm{M}}\right) \times 100$$

Onde:
E; Excentricidade do anel (%)
m; raio com a menor largura do anel (mm)
M; raio com a maior largura do anel (mm)

Este índice foi escolhido porque considerou-se o mais adequado para avaliação da excentricidade nas raízes. Alguns estudos usam equações nas quais estão envolvidos parâmetros como a topografia do terreno diferenciando as amostras coletadas na parte do tronco orientada à montate da vertente da parte do tronco orientada à jusante (WISTUBA et al., 2013, 2015). Por outro lado, outros estudos relacionaram o raio do tronco orientado à montante da vertente e o raio perpendicular a este (BRAAM; WEISS; BURROUGH, 1987). Estes métodos são dificilmente aplicáveis nas raízes pela dificuldade de identificar a orientação das raízes. O estudo de ROZAS (2003) permite calcular a excentricidade do crescimento relacionando o anel mais estreito com o anel mais largo das amostras extraídas do caule. Este método permite a sua aplicação em raízes, inclusive, apresenta a vantagem de poder visualizar a totalidade da seção transversal das raízes a diferença dos estudos em caules onde as amostras são baguetas extraídas pelo método não destrutivo. Assim, usou-se o método de ROZAS (2003) para a definição dos raios utilizados na medição da largura dos anéis e para a criação da cronologia das raízes.

A excentricidade foi um dos parâmetros considerados para a datação do primeiro ano da exposição das raízes. A determinação da mudança brusca na excentricidade foi realizada mediante a classificação do valor do índice de excentricidade. Baseado na magnitude da excentricidade, os valores foram classificados em quatro classes definidas como índices: 0

corresponde ao valor de excentricidade menor a 25%, 1 valor entre 25-50%, 2 valor entre 50-75 % e 3 valor maior a 75% (Figura 20). O sinal da mudança foi considerado muito forte quando o índice de excentricidade de dois anéis era 0 e dos dois anéis seguintes era 2 ou 3. Foi considerado sinal forte quando dois anéis de índice 0 eram seguidos de um valor 2 ou 3 sucedido por um índice 1. Também se considerou como mudança abrupta de sinal forte dois índices de valor 3 precedido de dois índices de valor 1 (Figura 20). Este conceito foi inspirado e adaptado de ŠILHÁN e STOFFEL (2015) realizado com caule para a identificação do sinal de *landslide*.

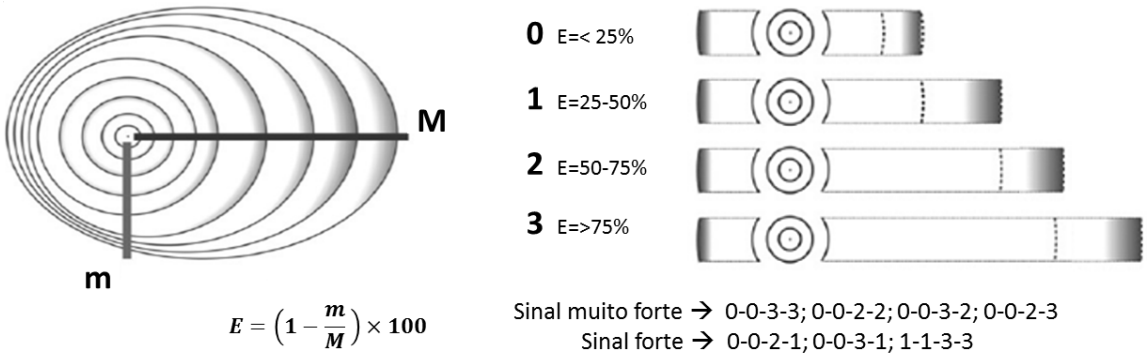
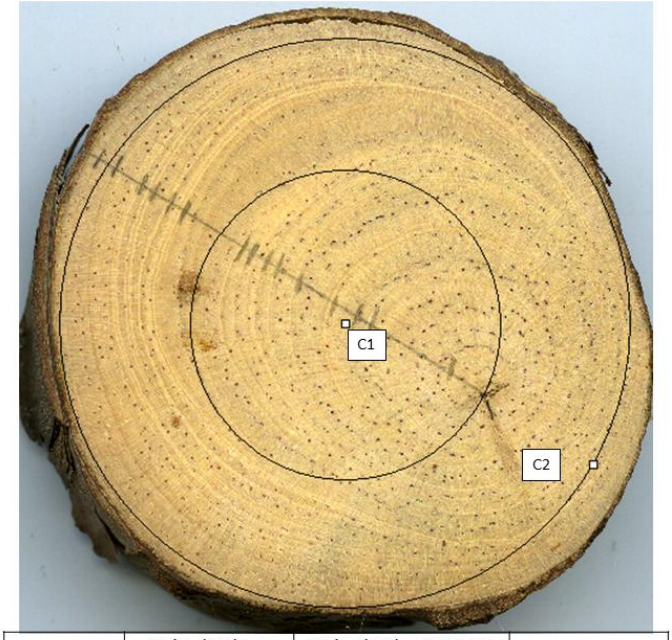


Figura 20 - Índice de excentricidade e valores do sinal da excentricidade. Adaptado de (ŠILHÁN; STOFFEL, 2015)

A excentricidade externa avaliou-se com o intuito de analisar a morfologia externa das raízes e poder identificar o efeito da erosão comparando raízes expostas, enterradas e raízes enterradas de árvores testemunhas. Para calcular a excentricidade da medula, primeiramente, identificou-se o centro hipotético da amostra, onde a raiz é totalmente circular e concêntrica (C1) (Figura 21). Depois, desenhou-se dentro da raiz o círculo máximo que marcava o centro hipotético seguido de outro círculo que saia do centro hipotético até a medula da raiz (C2). Com o comprimento dos dois raios calculou-se a proporção em porcentagem do raio do segundo círculo em função do primeiro raio que supostamente seria equivalente a 100 % do deslocamento (Figura 21). Finalmente, realizou-se um teste de comparação de médias (Teste de Tukey $p<0,05$) para identificar diferencias significativas entre os três tipos de raízes.



Amostra	Raio desde o centro hipotético (mm)	Raio desde o centro hipotético até a medula (mm)	Deslocamento da medula (%)
Pv7 EX r3 f1	18,86	10,26	54,40

Figura 21- Metodologia para a determinação do deslocamento da medula das amostras de raízes. C1 indica o círculo desde o centro hipotético até a posição da medula na amostra e C2 é o círculo hipotético com a medula concêntrica marcando o centro hipotético

4 RESULTADOS E DISCUSSÃO

Os resultados das diferentes análises serão apresentados distinguindo duas partes: as análises realizadas com as amostras do caule e as análises das raízes, ambas ajudarão a caracterizar os processos geomorfológicos da área.

4.1 Caule

4.1.1 Caracterização dos aneis de crescimento do caule

Na caracterizaçao dos aneis de crescimento do caule foram consideradas as diferentes especies de *Pinus*: *P.elliotti, P. taeda e P. oocarpa*.

P.elliottii possui anéis bem definidos de tons amarelados com uma marcante transição do lenho inicial para o lenho tardio (Figura 22). O lenho inicial apresenta maior largura na zona interna do lenho, próximo da medula, diminuindo na fase adulta correspondente aos anéis localizados próximos da casca. Os canais resiníferos são visíveis sob lente associados principalmente a parte do lenho tardio do anel de crescimento.

Observou-se a presença de numerosos anéis falsos os quais também foram caracterizados por outros autores que analisaram esta espécie. Destaca-se anatomicamente, a alta ocorrência de anéis falsos pouco antes da transição do lenho inicial e tardio (FORD; BROOKS, 2003). O lenho tardio começa quando as traqueídes do lenho inicial com paredes finas mudam rapidamente para traqueídes de lenho tardio com paredes mais grossas (Figura 22c). Porém, a falta de chuva durante o crescimento do lenho inicial pode causar a formação gradual e prematura de traqueídes com paredes grossas, formando um anel falso antes da formação do lenho tardio (HARLEY; GRISSINO-MAYER; HORN, 2011). Muitas das árvores estudadas apresentavam anéis muito pequenos perto da casca o que dificultava a medição e distinção entre anel verdadeiro ou falso (Figura 22d).

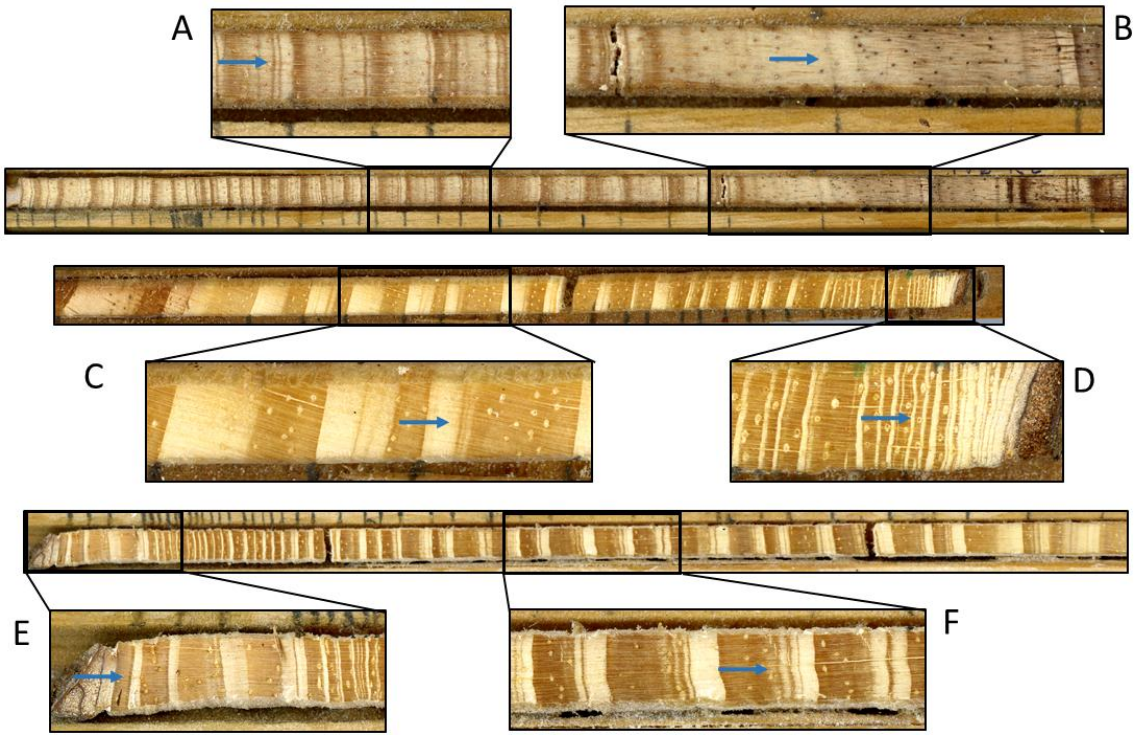


Figura 22 - a) e b) *P. oocarpa* mostrando anéis falsos e ausentes respectivamente (setas azuis), c) e d) *P. elliottii* anéis falsos e anéis muito pequenos próximo à casca respectivamente (setas azuis), e) e f) *P. taeda* anéis largos próximos a casca e anéis falsos respectivamente (setas azuis)

As árvores de *P. taeda* têm uma madeira de cor marrom, mais escura e sem tons amarelados distinguindo-se de *P. eliottii*. Produz um lenho com anéis de crescimento característicos de transição marcada entre lenho inicial e o lenho tardio (Figura 22) (CLARK; DANIELS; JORDAN, 2006). O lenho inicial apresenta espessura maior próxima da medula diminuindo na fase adulta. Os canais resiníferos são visíveis sob lente e associados principalmente ao lenho tardio. Ao igual do que *P. elliotti*, podem ser observados anéis falsos na transição do lenho inicial para o lenho tardio (Figura 22f). Este fato gera confusão e ambiguidade na distinção do limite que separa o lenho tardio e inicial, especialmente em árvores que crescem em ambientes de climas tropicais e subtropicais (SAMUELSON et al., 2013).

Frequentemente, em ambientes exóticos a densidade do lenho apresenta uma mudança gradual do lenho inicial e lenho tardio nos anéis de crescimento de *P. taeda* , ao contrário do que acontece em florestas naturais dos Estados Unidos (região originária desta espécie) onde normalmente apresentam uma mudança mais abrupta quando acaba a dormência. Do mesmo modo, a densidade ao longo do lenho tardio manifesta-se de forma gradual nas áreas de reflorestamento, favorecendo a formação de anéis falsos. Portanto, a temperatura favorável

dos ambientes tropicais induz uma expansão radial maior durante o ano, se comparado com as árvores localizadas no seu habitat nativo (SAMUELSON et al., 2013).

Inúmeros estudos salientam as diferenças entre as florestas naturais e as plantações em ambientes exóticos, reportando especialmente diferenças nas taxas de produção (JOKELA; DOUGHERTY; MARTIN, 2004; SAMUELSON et al., 2013; SCHULTZ, 1999). Este conceito deve ser considerado para explicar algumas características da madeira dos pinheiros do estudo atual, os quais foram plantados fora do seu nicho ecológico. Observou-se que tanto *P. elliotti* quanto *P. taeda* tinham uma porcentagem elevada de lenho tardio. Os verãos quentes aumentam a densidade máxima do anel. A densidade do lenho inicial é influenciada pela disponibilidade de água, enquanto a densidade do lenho tardio é condicionada por ambas, a temperatura e a disponibilidade de água (FRANCESCHINI et al., 2013). Restrições na umidade do solo limita o crescimento do lenho tardio, reduzindo a sua densidade e porcentagem (GONZALEZ-BENECKE et al., 2010; SAMUELSON et al., 2010). Hipoteticamente, a maior densidade relativa em menores latitudes é resposta ao aumento da formação do lenho tardio, favorecido por um período de crescimento mais longo e um período de produção de fotossínteses estendido (JOKELA; DOUGHERTY; MARTIN, 2004).

P. oocarpa contém maiores diferenças quando comparado com as outras duas espécies. O lenho apresenta uma coloração mais escura com matizes entre marrom e avermelhado (Figura 22). Os anéis de crescimento são grandes e o lenho inicial apresenta maior espessura tanto na fase juvenil quanto na fase adulta. Os canais resiníferos são visíveis sob lente localizados no lenho inicial e tardio. Os anéis de crescimento apresentam abundantes flutuações de densidade, tornando difícil diferenciar o limite que separa o lenho inicial, o tardio e, inclusive, o limite real que separa os anéis de crescimento (Figura 22a). Alguns autores já observaram a grande dificuldade na identificação dos anéis pela aparição de anéis falsos (HOWELL; MATHIASEN, 2004) compostos por um lenho tardio anômalo que irrompia dentro o desenvolvimento do lenho inicial (JOHNSON, 1980). Os mesmos autores concluíram que *P. oocarpa* é propenso à formação de anéis falsos que dificultam a identificação dos anéis verdadeiros. Além disto, destacaram a ausência de alguns anéis ao longo da secção transversal das amostras tal como pode se apreciar na amostra da Figura 22b.

4.1.2 Dendrocronologia e datação cruzada do caule

O resultado da datação cruzada, para o controle da qualidade dos anéis de crescimento com o programa COFECHA, mostrou correlações significativas entre os crescimentos das diferentes amostras do caule com valores acima do intervalo de confiança de 0,51 ($p<0,01$)

(Tabela 3). Isso indica que as árvores apresentaram incrementos anuais semelhantes controlados por um mesmo fator. O tamanho de cada anel das árvores foi influenciado por fatores bióticos e abióticos. Os fatores abióticos incluem a composição genética (por exemplo, a idade) e são individuais para cada espécie e cada árvore (FRITTS, 2001). Desta forma, este estudo usou os indivíduos de *Pinus elliottii* para análise cronológica porque foi a espécie mais amostrada. Observou-se que as árvores de *P. oocarpa* apresentavam um padrão de crescimento diferente, detectado pelo próprio programa, mostrando correlações muito baixas com a serie máster. Por outro lado, o fator abiótico inclui a luz, temperatura, água, disponibilidade de nutrientes, influência de vento forte, etc. e são aproximadamente comuns para todas as árvores que crescem em um local específico (FRITTS, 2001). Portanto, as árvores que crescem no mesmo lugar registrarão os mesmos impactos e flutuações ambientais na sua série de anéis de crescimento (COOK; KAIRIŪKŠTIS, 1992). Este sinal comum é visível quando as correlações entre as series de crescimento das plantas é maior a 0,51, tal como apresentam os dois grupos (Tabela 3). O valor da sensibilidade média mostra que ambos grupos são sensíveis (sensibilidade > 0,30) (GRISSINO-MAYER, 2001).

Tabela 3 – Correlação das series *cronológicas com* COFECHA

Árvores	N° de árvores	N° de series	Inter correlação média*	Sensibilidade média
Testemunhas	7	16	0,51	0,37
Com erosão	6	11	0,56	0,36

*Correlação crítica pelo programa COFECHA = 0,51

Estes resultados são similares a outros estudos realizados com esta espécie. Os autores HARLEY; GRISSINO-MAYER; HORN (2011) conseguiram uma série cronológica de 139 anos de 32 árvores de *P. elliottii* cuja inter-correlação média foi 0,52 e sensibilidade media 0,39. Por outro lado, PARKER; JENSEN; PARKER (2014) obtiveram uma série cronológica de 192 anos (22 árvores) com uma inter-correlação 0,52 e sensibilidade média de 0,29. Ambos os estudos evidenciaram a presença de anéis falsos e ausentes que dificultavam a identificação dos anéis de crescimento anual. Estes são resultados de estudos realizados no habitat natural do *P. elliottii*, nos Estados Unidos.

Em Piracicaba, encontrou-se um estudo dendrocronológico de 10 árvores de *Pinus caribaea* com resultados de inter-correlação de 0,59 (correlação crítica pelo programa COFECHA 0,42) e sensibilidade média de 0,39 (VENEGAS GONZÁLEZ, 2013). A correlação obtida da datação cruzada das árvores testemunhas foi 0,51, onde participaram 16

series cronológicas de 7 árvores diferentes (Tabela 3 e Figura 23). Este resultado confirma a existência de um sinal comum no crescimento das árvores. Mesmo que acorrelação não tinha sido muito elevada, a maior parte das árvores amostradas foi correlacionada, sendo que este grupo era formado por dez árvores, sendo nove *P. elliotti*. Ou seja, foram correlacionadas sete árvores de um total de nove. Mesmo assim, foi necessário fazer uma segunda amostragem para coletar um terceiro raio porque muitas das amostras apresentaram dificuldades na identificação dos anéis, por exemplo, anéis muito pequenos e falsos, excesso de resina ou podridão. Para melhorar a análise dendrocronologia e obter uma cronologia mais representativa, seria necessário um número maior de árvores amostradas e coletar maior número de amostras por árvore para diminuir os possíveis erros por anéis falsos.

O grupo das árvores com influência da erosão teve uma inter-correlação média de 0,56, produto de 11 séries pertencentes a 6 árvores diferentes de um total de 15 (Tabela 3 e Figura 23). A análise dos valores de correlação evidenciou que algumas séries de crescimento se adequaram por um bom ajuste à série máster e, portanto, foram excluídas garantindo o valor critico de significância (0,51 em COFECHA- Pearson 99%). Observou-se que Pv1, embora sendo de outra espécie, correlacionava bem com as outras series, motivo pelo qual resolveu-se incluir este indivíduo para obter uma cronologia final mais robusta e representativa.

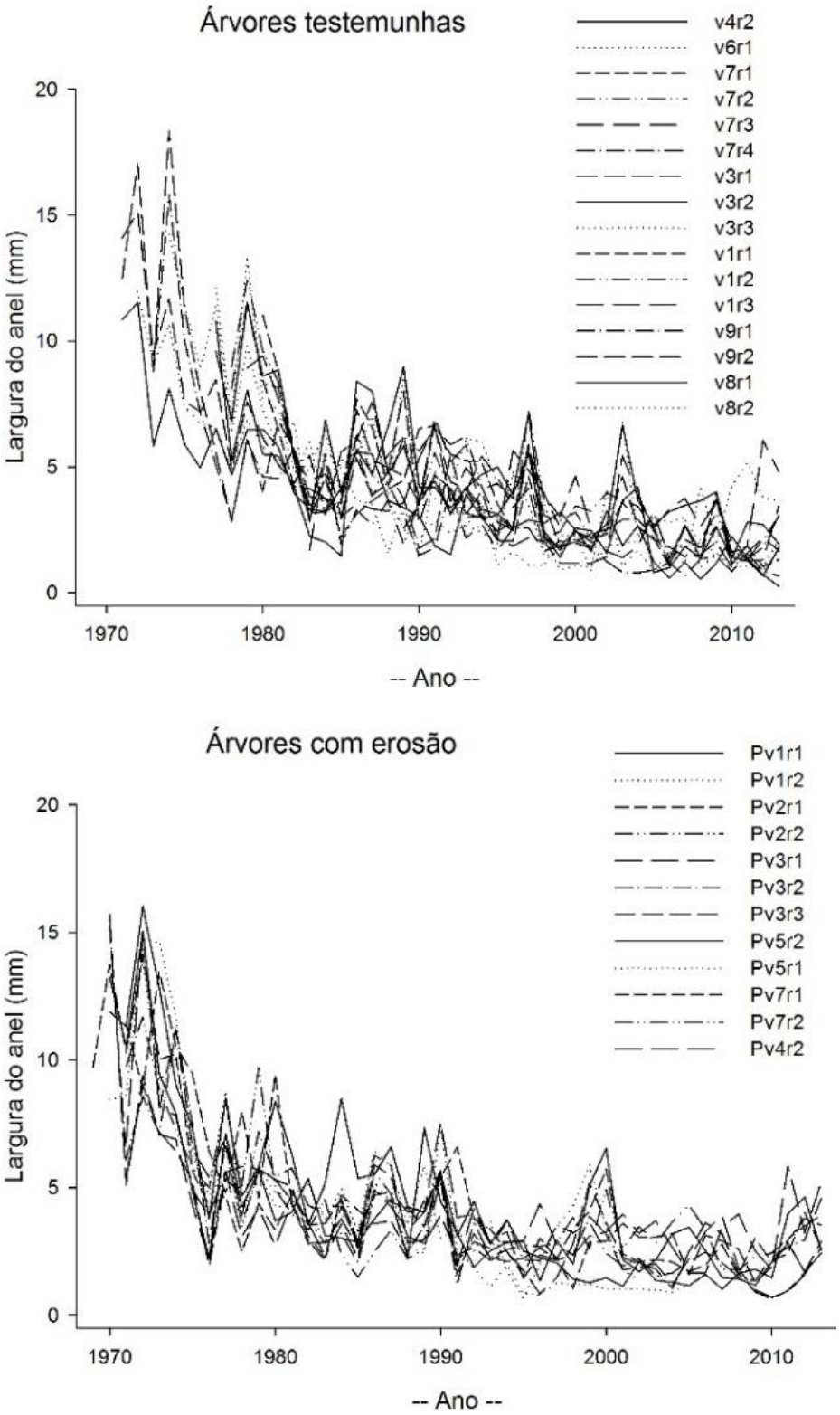


Figura 23 – Series cronológicas das diferentes árvores que correlacionaram os crescimentos

Nota-se que este grupo, árvores com erosão, obteve maior correlação que as árvores testemunhas, o que pode ser explicado pelo número menor de árvores adicionadas na formação da cronologia final. O uso de um número menor de árvores e número maior de raios por árvore pode acarretar melhor sincronia nas cronologias e, dessa forma, maior correlação.

Cabe destacar a importância da localização das árvores com erosão que foram inclusas na cronologia indicando crescimento similar (Figura 23). Estas árvores são: Pv1, Pv2, Pv3, Pv4, Pv5 e Pv7. Todas estão localizadas na parte mais alta da área onde ocorre menor erosão (Figura 14). Pv1, Pv2, Pv3, Pv4 e Pv7 estão localizadas onde dominam processos de erosão laminar e voçorocas efêmeras de profundidade próxima de 50 cm o menor. Para explicar este resultado, pode-se dizer que além das informações específicas do local comum a todas as árvores, as árvores individuais também podem registrar os efeitos da perturbação mecânica causadas por processos geomorfológicos (BOLLSCHWEILER; STOFFEL, 2010; STOFFEL; WILFORD, 2012). Estes processos serão registrados nas séries das árvores afetadas produzindo-se anomalias em cada árvore, dificultando a sincronização cronológica com outros indivíduos do lugar (STOFFEL, 2010). Este fenômeno ajuda a explicar por que somente as árvores das partes mais altas (localizadas sobre voçorocas efêmeras) foram as únicas correlacionadas pelo COFECHA, enquanto que as árvores da parte inferior, aquelas situadas no entorno da voçoroca profunda, apresentaram dificuldades na sincronização das series. Deste modo, as series das árvores Pv6, Pv8, Pv9, Pv10, Pv11, Pv12, Pv13, Pv14 e Pv15 foram removidas da cronologia final, já que apresentavam baixa correlação com a série máster. Apesar de Pv6 e Pv8 estarem situadas na parte superior da zona de estudo (Figura 14), pertencem a espécies diferentes, *P. oocarpa* e *P. taeda* respetivamente, e consequentemente o crescimento anual delas foi diferente das árvores de *P. elliotti*. As árvores Pv9 e Pv10 se situam na zona intermédia da área, caracterizada por apresentar processos de sedimentação. As árvores Pv11, Pv12, Pv13, Pv14 e Pv15 estão situadas na parte inferior da área. Nesta zona a voçoroca é bastante grande, atingindo os 6 metros de largura e supera os 2,50 m de profundidade em algumas partes, além de ser a área com maior número de *pipings* (Figura 14). Portanto, o crescimento destas árvores é comprometido e diferenciado devido a elevada atividade dos processos erosivos. Em resumo, a pouca correlação destes indivíduos com a série máster afirma a existência de um sinal muito forte agindo sobre eles, sendo o processo erosivo a causa mais provável. Mesmo assim, deve ser considerado para o entendimento deste resultado tanto a complexidade da datação quanto os possíveis erros cometidos devidos à existência de anéis muito pequenos e falsos que apareciam nas series destas árvores.

Na continuação apresenta-se os dados da padronização das séries cronológicas dos anéis de crescimento para os dois grupos estudados, árvores testemunhas e com erosão (Figura 24). A padronização foi realizada com o programa ARSTAN que retira as tendências biológicas do crescimento das plantas e mantêm o sinal comum das árvores de uma mesma área, por exemplo, o sinal climático (COOK; KAIRIŪKŠTIS, 1992).

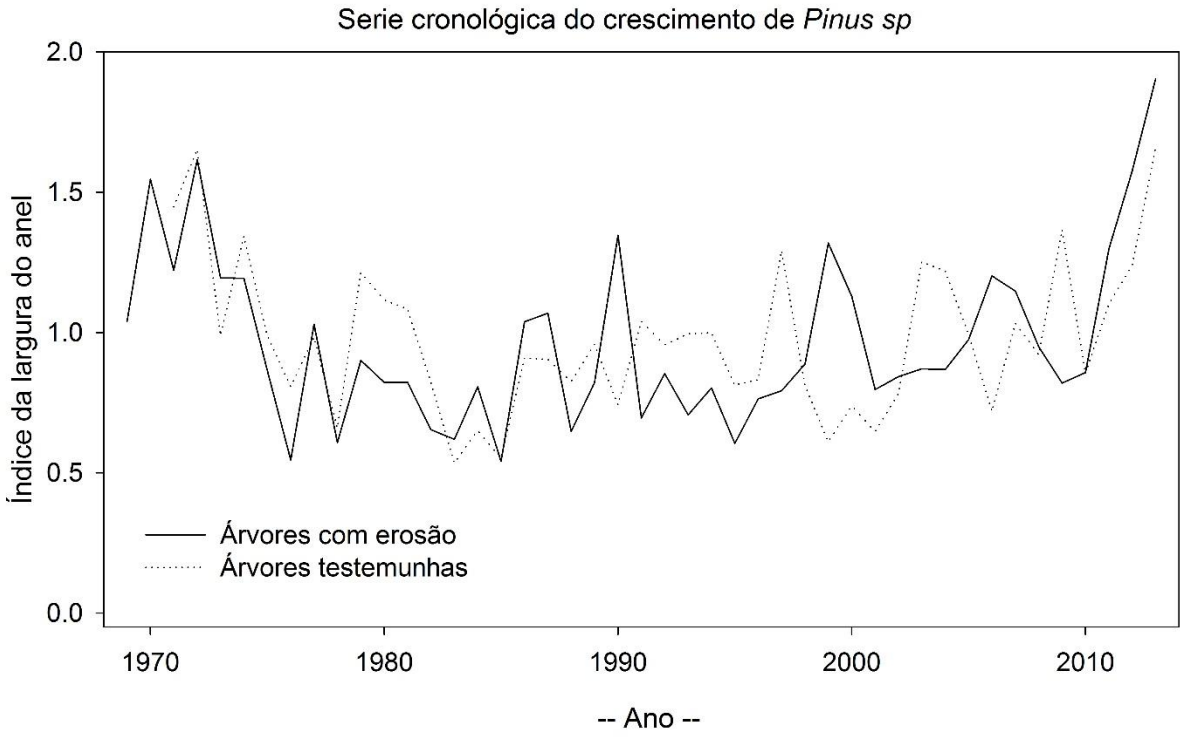


Figura 24 - Série cronológica do crescimento de *Pinus sp.* obtida com o programa ARSTAN

O resultado final da padronização foi a obtenção das series de crescimento para as árvores testemunhas e com erosão no período de 1969 a 2013 (Figura 24). Observa-se que as cronologias não são iguais, o qual confirma o que anteriormente foi comentado sobre como os processos erosivos poderiam ter influenciado no crescimento das plantas e ter o seu registro nos anéis. Embora não sejam iguais, as duas séries do índice ARSTAN apresentaram uma correlação significativa de 0,532 (correlação de Pearson 99%) para o período de 42 anos estudado (Tabela 4). Na Figura 24, é possível observar tendências similares entre os anos 1969 e 1990. Os picos e as quedas de ambas as cronologias acontecem nos mesmos anos. Destaca-se, por exemplo, como ambas as cronologias sofrem uma queda do crescimento em 1978 o qual teve uma precipitação anual de 873 mm (POSTO AGRO METEOROLÓGICO DA ESALQ-USP, 2015). Também há uma queda do gráfico devido à seca dos anos 1984 e 1985 com 890 e 970 mm de precipitação, respectivamente, seguido de um crescimento em 1986

(precipitação 1322 mm). A seca do 2003-2005 foi registrada pela cronologia das árvores com erosão. Possivelmente, elas foram as mais afetadas pelo fato de terem raízes expostas e localizadas perto de voçorocas, fato que reflete na diminuição da umidade do solo. Contudo, nenhuma das series cronológicas apresentou correlação com o clima mediante o teste de correlação de Pearson (resultados serão apresentados posteriormente).

Tabela 4 - Correlações entre a cronologia das árvores testemunhas e com erosão

Correlações entre a cronologia das árvores testemunhas e com erosão	
Desde 1971-2013	0,532*
Desde 1971-1990	0,708*
Desde 1990-2013	0,365

* Coeficiente de correlação de Pearson p<0,001

Durante o período 1971-1990 a correlação entre as duas cronologias é elevada com um valor de 0,708 (Tabela 4), porém, após do ano 1990 até o ano 2013 as cronologias não têm correlação entre elas (0,365). Estes dados indicam a ocorrência de uma mudança externa a partir do ano 1990 que provocou que os grupos tivessem crescimentos anuais diferentes. Esta mudança externa poderia estar relacionada com os processos erosivos o qual reafirmaria a hipótese inicial. Como já foi mencionado anteriormente, existe um primeiro estúdio dendrogeomorfológico desenvolvido na área (BOVI, 2013) que pode ajudar a encontrar uma explicação para esta mudança entre as séries cronológicas. Nesse estudo foram analisadas as cicatrizes das raízes da espécie nativa chamada guapuruvu (*Schizolobium parahyba*) e foi observado que as cicatrizes mais antigas foram datadas em 1989 e 1992, as quais pertencem a duas árvores situadas na parte inferior da área de estudo. Estas datações correspondem ao ano de mudança observada nas séries cronológicas do presente estudo. Portanto, a alteração pode estar relacionada com o início do estabelecimento da erosão próxima ao ano 1990. Isto poderá ser conferido com os dados obtidos da datação da erosão com o uso das raízes.

Os dados de precipitação mensal do ano 1990 (Tabela 5) mostra valores altos para o mês de julho (134,6mm) depois de 3 meses de seca. Este valor é muito mais elevado que a média deste mês para 50 anos, sendo de 33 mm. Os eventos chuvosos fora do período de chuvas provocam notáveis aumentos dos processos erosivos (GUERRA; SILVA; BOTELHO, 1999). Isto é devido a que depois de um período de seca, a vegetação se encontra em situação

crítica, portanto, no início das chuvas, o solo não está totalmente protegido pela vegetação observando-se um incremento da erosão (KIRKBY; MORGAN, 1980).

Tabela 5 - Dados de precipitação de Piracicaba (POSTO AGRO METEOROLÓGICO DA ESALQ-USP, 2015).

	Precipitação (mm)								
	1986	1987	1988	1989	1990	1991	1992	1993	1994
Jan	143,0	342,9	185,3	370,8	271,4	266,6	99,2	179,9	134,8
Fev	96,2	203,1	328,3	298,3	145,9	217,6	72,4	232,1	154,4
Mar	320,8	105,6	194,3	99,0	240,2	431,9	232,7	155,9	222,7
Abr	47,5	70,6	140,0	103,9	37,2	129,6	79,9	57,7	114,9
Mai	88,6	199,9	104,3	33,0	47,1	42,1	73,8	119,7	56,2
Jun	0,0	122,7	26,8	47,0	12,7	35,1	0,6	47,0	36,7
Jul	10,5	10,7	0,0	85,2	134,6	15,2	36,6	13,7	24,7
Ago	133,2	5,9	0,0	32,0	40,9	4,7	11,1	51,8	0,0
Set	36,7	72,9	4,1	36,1	61,0	68,9	87,5	154,4	0,5
Out	52,9	67,0	196,9	46,3	125,4	70,5	242,1	73,4	126,8
Nov	110,4	113,3	86,0	99,9	124,4	56,8	232,3	91,6	249,2
Dez	282,3	190,5	200,4	195,1	61,1	194,5	142,2	146,4	260,8
Anual	1322,1	1505,1	1466,4	1446,6	1301,9	1533,5	1310,4	1323,6	1381,7

A consideração da distribuição temporal das chuvas é de fundamental importância, pois eventos chuvosos que acontecem em períodos curtos de tempo têm grande impacto no aumento dos processos erosivos (TOY; FOSTER; RENARD, 2002). O histórico de dados diários de precipitação do Posto Meteorológico da ESALQ-USP (2015) mostra uma distribuição temporal das chuvas ao longo do mês de julho de 1990 e registra 3 dias chuvosos de mais de 20mm. Porém, somente são consideradas chuvas muito erosivas aquelas que superam os 25mm/hora (HUDSON, 1965). Já no ano 1988 teve a ocorrência de uma seca grande de junho até setembro. Após da seca, o mês de outubro teve uma elevada precipitação concentrada em 3 dias descontínuos com uma precipitação diária de mais de 40mm. Por isso, seriam necessários dados de precipitação mais precisos. Entretanto, o posto meteorológico começou a registrar a precipitação a cada 15 minutos a partir do ano 1996. Estas chuvas eventuais que aconteceram no final da época seca em 1990, 1988 e anos próximos, pode ter influenciado na degradação do solo e no crescimento das plantas da área de estudo provocando mudanças nas cronologias.

Em seguida, apresenta-se a comparação das cronologias dos pinheiros com as séries cronológicas das árvores de guapuruvu localizadas na área de estudo que foram obtidas dos resultados de BOVI (2013). Analisando estes dados, observa-se como o guapuruvu é uma

árvore que tem crescimento médio anual maior. Aparentemente todas as series têm uma tendência de crescimento similar desde o início até 1990, porém este padrão se modifica a partir deste ano (Figura 25). Este resultado é similar ao observado nas cronologias de *Pinus sp*. Portanto, reafirma-se que próximo ao ano 1990 teve um evento externo que mudou o crescimento das árvores de cada grupo.

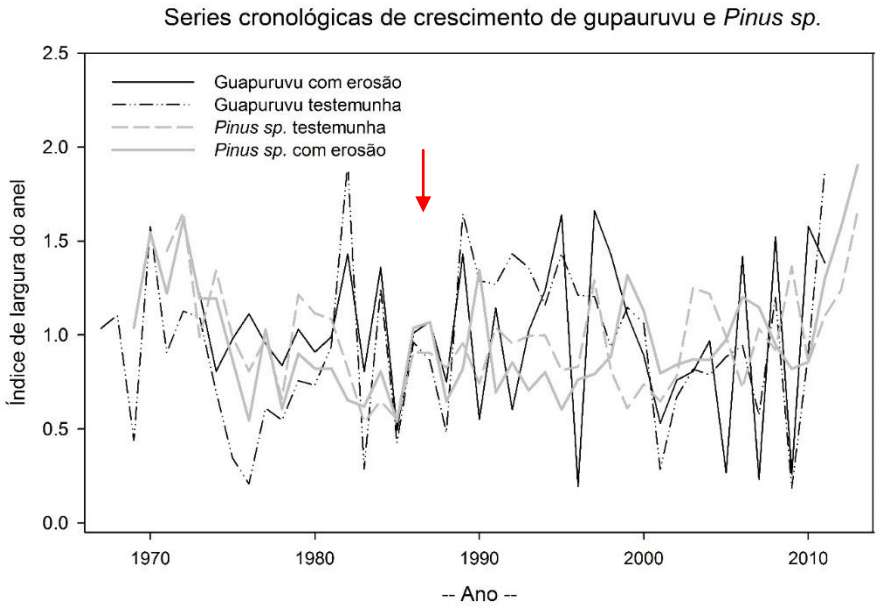


Figura 25 – Series cronológicas de crescimento de guapuruvu e *Pinus sp*

4.1.3 Dendroclimatologia: influência do clima local

Neste tópico serão apresentados os resultados da correlação do crescimento anual das árvores com o clima. O clima é um fator determinante no crescimento do diâmetro do tronco das árvores que reflete na formação de anéis largos ou estreitos, resultado da maior ou menor atividade cambial, respectivamente. Na região da área de estudo, a parada da atividade cambial das árvores acontece nos meses de inverno (junho, julho e agosto) que são caracterizados por um período de seca e baixas temperaturas. Por outro lado, a maior atividade cambial das plantas acontece nos meses de verão (dezembro, janeiro e fevereiro).

O crescimento do anel da arvore é uma resposta a uma integração de influências climáticas que ocorrem durante um período prolongado, tanto no período prévio à formação do anel quanto durante a sua formação (FRITTS, 2001). Deste modo, as correlações foram realizadas em períodos de três meses desde a primavera do ano anterior ao crescimento (setembro, outubro e novembro: SONp) até o outono do ano do crescimento do anel (MMA). As árvores testemunhas não apresentaram correlação climática nem com a temperatura nem

com a precipitação (Figura 26). Por outro lado, a série cronológica das árvores com erosão apresentou correlação climática com a precipitação durante os meses da primavera anterior ao crescimento do anel. Esta correlação foi negativa, ou seja, o aumento da precipitação durante estes meses provoca a diminuição do crescimento das árvores (Figura 26). Não se observaram outras correlações climáticas para este grupo de árvores.

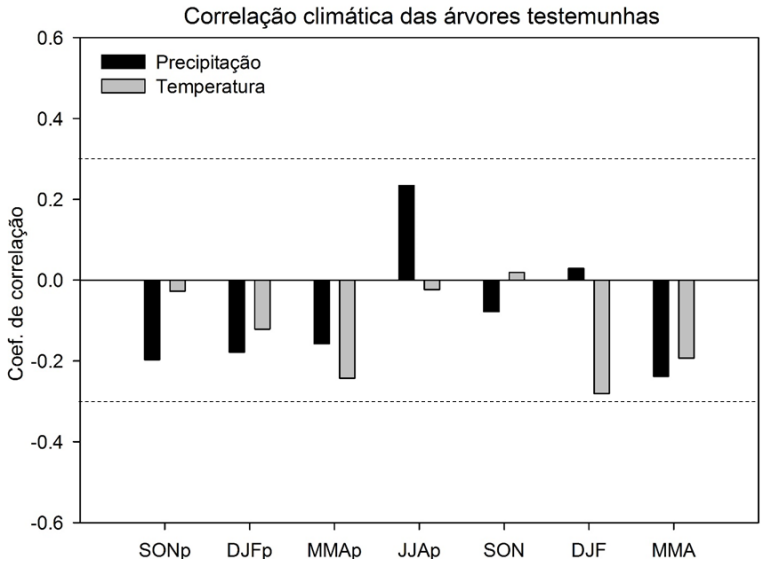


Figura 26a - Correlação dos anéis de crescimento das árvores de Pinus sp. com a precipitação e a temperatura (1969-2013). A letra p nos meses significa meses prévios e meses sem letra é o ano atual. A linha horizontal descontinua indica o limite da significância estatística. * Meses com correlação significativa (Coef. De correlação de Pearson p<0,05)

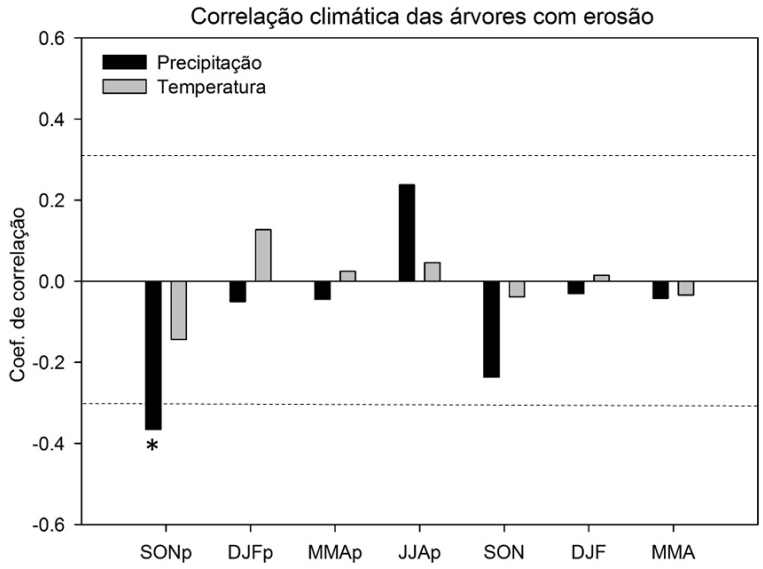


Figura 26b - Correlação dos anéis de crescimento das árvores de Pinus sp. com a precipitação e a temperatura (1969-2013). A letra p nos meses significa meses prévios e meses sem letra é o ano atual. A linha horizontal descontinua indica o limite da significância estatística. * Meses com correlação significativa (Coef. De correlação de Pearson p<0,05)

A ausência de correlação entre o crescimento e o clima pode ser explicada pelas condições favoráveis que as árvores têm quando se desenvolvem em ambientes exóticos. Condições favoráveis de temperatura e precipitação estão diretamente relacionados com a energia e água disponível que a planta necessita para realizar os processos fisiológicos fundamentais, tais como fotossíntese e evapotranspiração (VENEGAS-GONZÁLEZ et al., 2015). Por isso, no trabalho de SAMUELSON et al., (2013) esperavam não encontrar correlação climática com o crescimento de plantações de pinheiros em ambientes exóticos. Os resultados deste estudo na área de Tupi foram similares aos resultados de *Pinus caribaea* na região de Piracicaba que não apresentaram correlação com a temperatura e a precipitação (VENEGAS GONZÁLEZ, 2013). Embora, as árvores de estudo não tiveram relação significativa com a temperatura e a precipitação, tal vez, o crescimento fosse sensível para outros índices mais adequados. Alguns autores afirmam que a relação entre essas variáveis não é direta nos estudos agroclimáticos e que elas podem não garantir as suficientes quantidades de água disponível do solo para as árvores (RIBEIRO et al.,2011). Possivelmente, seja esta a razão de não poder encontrar valores similares aos estudos dos pinheiros das florestas naturais.

Os pinheiros que crescem em seus ambientes nativos, os aumentos da temperatura e a presença de regimes hídricos adequados durante a época de crescimento exercem um efeito positivo sobre o desenvolvimento das árvores (FORD; BROOKS, 2003). Porém, verões muito quentes estão associados a elevadas taxas de evapotranspiração, aumento de respiração e condições de estresse hídrico (FOSTER; BROOKS, 2001; HARLEY; GRISSINO-MAYER; HORN, 2011). A disponibilidade de água é o maior fator limitante para o crescimento radial das árvores de *P. elliottii* (PARKER; JENSEN; PARKER, 2014). Talvez as precipitações anuais da região de Piracicaba são suficientes para atingir a demanda de *P. elliotti* na época de crescimento e por isso não apresentem correlações significativas.

A relação negativa do crescimento com a precipitação durante a primavera prévia não é muito habitual. Observou-se a mesma tendência no ano concorrente, entretanto não significativa. A maioria dos autores mostram correlações positivas com a precipitação já que a água é um fator relevante no início da época de crescimento. Porém, um estudo revela o mesmo resultado para a primavera do ano concorrente (HARLEY; GRISSINO-MAYER; HORN, 2011), argumentando a existência de um sinal relacionado com o estresse de umidade, sendo que temperaturas mais elevadas podem resultar em maiores taxas de evapotranspiração.

4.2 Raízes

4.2.1 Caracterização e datação dos anéis de crescimento das raízes.

A caracterização dos anéis de crescimento das raízes foi similar à do caule para as diferentes espécies: *P. elliottii*, *P. oocarpa* e *P. taeda*. Entretanto, cabe destacar a complexidade elevada na identificação dos anéis de crescimento nas raízes. Da mesma forma que no caule, as raízes demostraram problemas de anéis falsos e anéis ausentes, porém, em maior número, dificultando a identificação dos anéis verdadeiros. As amostras apresentaram deformações, cicatrizes e lenho de reação, ocasionando a excentricidade da medula que, por sua vez, provocava descontinuidades ao longo do anel e a não distinção de diferentes anéis (Figura 27). Ainda, outro problema encontrado para a distinção dos anéis de crescimento foi a presença de anéis muito estreitos, especialmente aqueles próximos à casca, e a marcação não expressiva e de transição não abrupta de alguns anéis de crescimento (Figura 27).

Com o exposto acima, optou-se por analisar várias fatias de uma mesma raiz e diferentes raízes da mesma árvore, objetivando diminuir os erros na delimitação e marcação dos anéis de crescimento por meio da comparação de diferentes amostras. Desta maneira, foram comparadas as diferentes amostras, procurando, inicialmente, identificar anéis característicos (anéis marcadores) que se revelaram em amostras da mesma raiz ou árvore e, posteriormente, correlacionando os anéis de crescimento. A utilização dessa metodologia foi essencial para, por exemplo, conferir anéis pouco

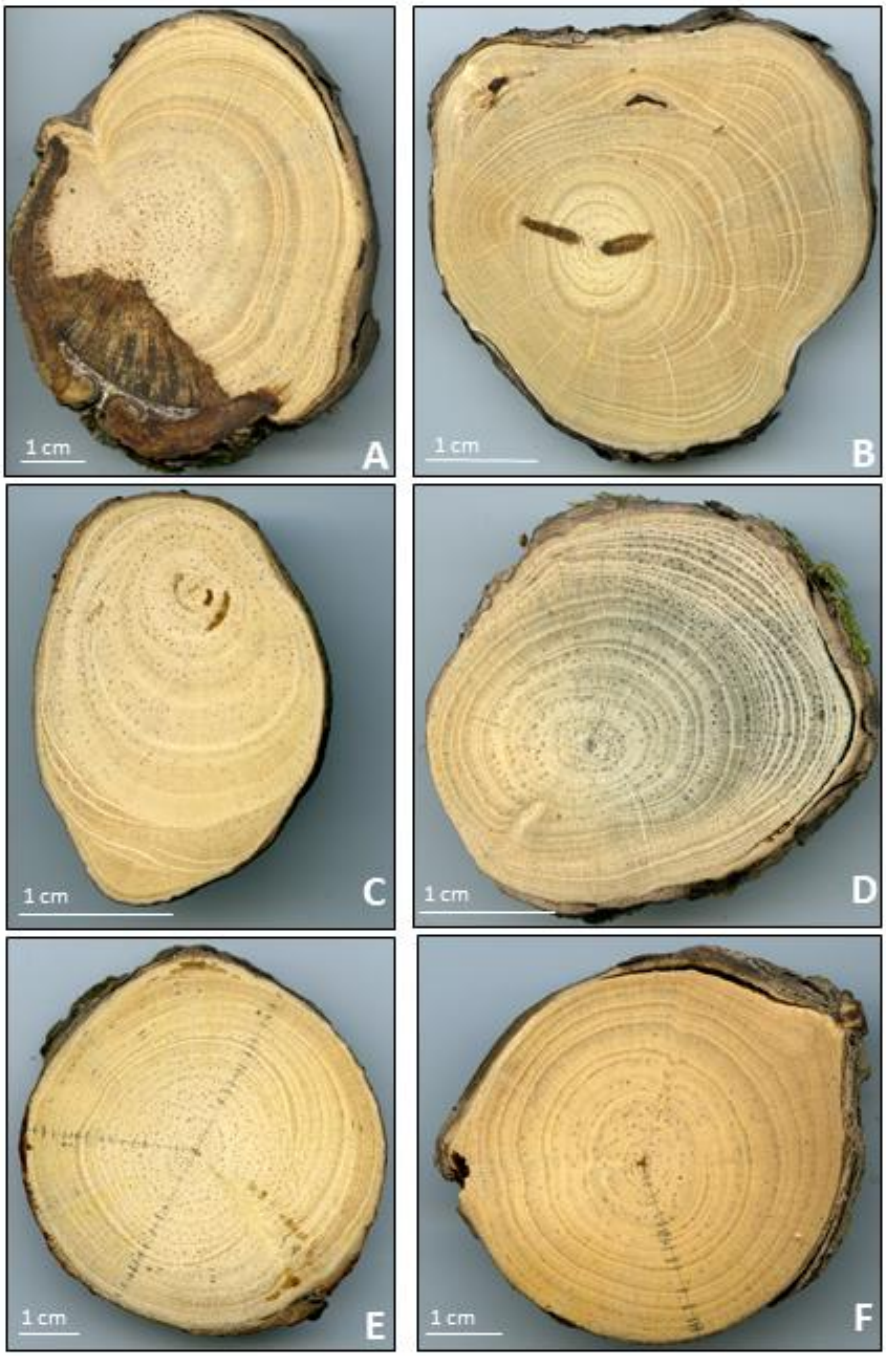


Figura 27- a) amostra deformada pela formação de uma cicatriz, b) amostra com cicatrizes, elevada excentricidade e descontinuidade de anéis, c) amostra com pouca marcação dos anéis de crescimento, excentricidade e falta de continuidade dos últimos anéis, d) Amostra excêntrica e desaparição de anéis em uma secção da amostra, e) raiz enterrada de árvore testemunha com a medula concêntrica e f) raiz enterrada com a medula concêntrica de árvore afetada pela erosão

marcados em uma fatia com as outras fatias onde eles apareciam com maior nitidez e, ainda, diferenciar possíveis flutuações de densidade que poderiam ser classificadas como anel de crescimento verdadeiro. Isto foi observado pelos autores WROŃSKA-WAŁACH et al. (2016)

que destacaram a importância de usar diferentes fatias de uma mesma raiz para melhorar datação.

As espécies *P. taeda* e *P. oocarpa* demarcaram melhor os anéis de crescimento, sendo mais fácil a sua identificação. Mesmo assim, todas as espécies apresentaram serias dificuldades na identificação, o que determina que os resultados obtidos sejam estimações.

4.2.2 Excentricidade, densidade e correlação dos anéis das raízes enterradas

A exposição das raízes enterradas provoca uma série de mudanças na sua morfologia tanto externa quanto interna. As raízes quando expostas mudam a sua estrutura anatômica assemelhando-se ao lenho do caule (CHARTIER et al., 2016) e a morfologia externa sofre deformações devido ao impacto de fatores externos causando crescimento excêntrico e cicatrizes (STOFFEL; CORONA, 2014). Neste trabalho, observou-se que as amostras de raízes enterradas mostravam em sua maioria medulas concêntricas e anéis de crescimento de largura constante ao longo do anel (Figura 27e e f). Os resultados da determinação da porcentagem do deslocamento da medula confirmaram de forma quantitativa as diferenças entre os diferentes grupos de raízes (raízes expostas, raízes enterradas de árvores testemunhas e raízes enterradas de árvores afetadas pela erosão). As raízes expostas apresentaram um deslocamento médio da medula maior do que as raízes enterradas das árvores com erosão e as raízes das árvores testemunhas, sendo 43 %, 18 % e 15 % respectivamente (Figura 28). Os resultados mostraram diferenças estatísticas significativas entre o grupo de raízes expostas e os outros grupos ($p<0,05$ pelo teste de Tukey). Desta forma, pode-se afirmar que a erosão afeta sensivelmente à deformação das raízes uma vez que as raízes expostas apresentaram maior excentricidade da medula quando comparado com as raízes enterradas, tanto das árvores testemunhas quanto das árvores com erosão, que eram concêntricas.

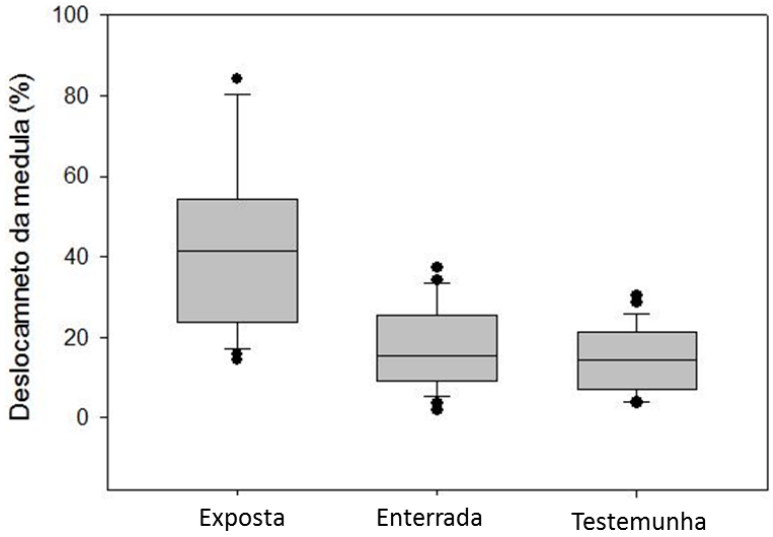


Figura 28 – Deslocamento da medula (%) para os diferentes grupos: raízes expostas, enterradas e testemunhas

Os resultados da densidade do lenho mediante o analises de imagens de raios X confirmaram os resultados anteriores sobre a excentricidade das amostras. As raízes enterradas e testemunhas proporcionaram um perfil da densidade do lenho diferente (Figura 29) quando comparados com os perfis de densidade do lenho das raízes expostas que serão apresentados posteriormente (Figura 30, 33 e 35). Os valores médios de densidade foram geralmente menores nas raízes enterradas.

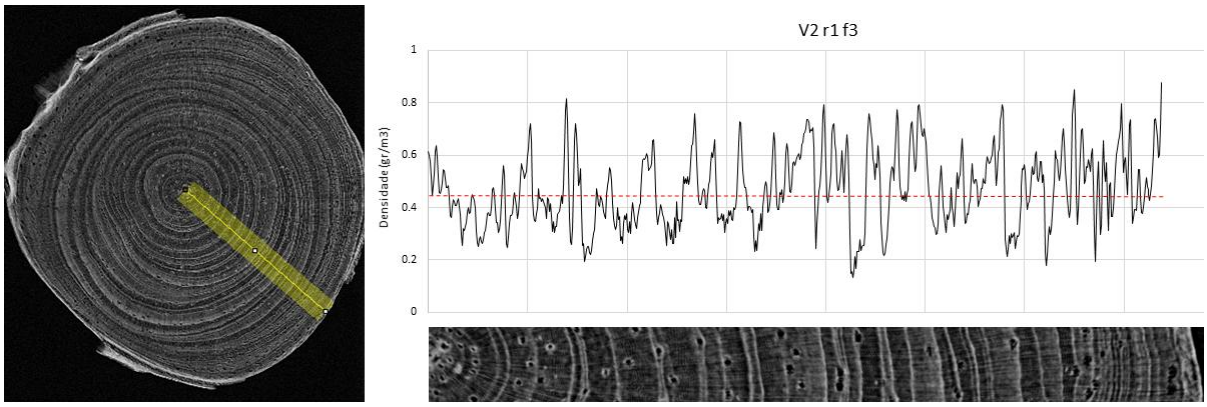


Figura 29 - Imagem de raio X da amostra junto com o gráfico da densidade aparente da madeira. A linha tracejada vermelha representa a média da densidade do lenho

A correlação entre os anéis das raízes com o programa COFECHA somente foi realizada nas amostras das raízes testemunhas, já que foram as amostras que apresentaram menos problemas de excentricidade, o qual facilitava a identificação e sincronização dos anéis. Mesmo assim, os resultados obtidos com o programa COFECHA não foram significativos. A inter-correlação média das series foi 0,46 (correlação crítica pelo programa

0,51) e sensibilidade média 0,60 que indica que são sensíveis aos estímulos ambientais. Estes resultados foram obtidos por meio das correlações de 27 series provenientes dos raios demarcados e analisados de 7 raízes de 6 árvores diferentes. A dificuldade para obter correlações significativas nas raízes provenientes de árvores testemunhas (sem apenas excentricidade) reafirma os problemas já mencionados por diversos autores da dificuldade de conseguir correlações em raízes expostas (BODOQUE et al., 2005, 2011; CORONA et al., 2011; HITZ et al., 2008; STOFFEL et al., 2013).

4.2.3 Datação do primeiro ano da exposição da raiz e análise dendrogeomorfológica

Nesta seção, apresentam-se, a título de exemplo, alguns resultados obtidos da análise dendrogeomorfológica das raízes, representando o procedimento realizado para todas as raízes. A análise de cada uma das fatias permitiu identificar as mudanças anatômicas que ocorreram na raiz que ajudaram a determinar, de forma estimada, os processos erosivos e a sua dinâmica temporal na área de estudo. A identificação das mudanças anatômicas das raízes foi realizada pela análise da: 1) largura do anel, 2) porcentagem do lenho tardio, 3) índice de excentricidade e 4) densidade da madeira.

A árvore Pv2 foi escolhida para ilustrar o procedimento desenvolvido com todas as árvores. As series das diferentes fatias de raízes, tanto expostas quanto enterradas, foram correlacionadas (coeficiente de Pearson) com o intuito de reduzir erros de datação. Os resultados das correlações entre as raízes da árvore Pv2 foram significativos (Tabela 6). Apresentaram boa correlação entre as fatias das raízes enterradas (0,96), as fatias da raiz 1 (0,97) e fatias da raiz 2 (0,76 e 0,62), ambas expostas. Além disso, as séries da raiz enterrada tiveram correlação significativa com as series de algumas fatias de duas raízes expostas (Pv2 Ex r1 f1, Pv2 Ex r1 f2 e Pv2 Ex r2 f2). Possivelmente, a falta de correlação de alguma das fatias das raízes com outras series pode ser devido a problemas já mencionados como, por exemplo, o crescimento excêntrico dos anéis. Entretanto, os resultados das correlações significativas indicam que as raízes obtiveram crescimentos similares e sincronizados, o que é importante para verificar a datação.

Tabela 6 – Matriz de correlação das series das raízes da árvore Pv2 (ET indica enterrada e Ex indica exposta)

	Pv2 ET r1 f1	Pv2 ET r1 f3	Pv2 Ex r1 f1	Pv2 Ex r1 f2	Pv2 Ex r2 f2	Pv2 Ex r2 f4	Pv2 Ex r2 f6
Pv2 ET r1 f1	1,00						
Pv2 ET r1 f3	0,96*	1,00					
Pv2 Ex r1 f1	0,68*	0,71*	1,00				
Pv2 Ex r1 f2	0,79*	0,80*	0,97*	1,00			
Pv2 Ex r2 f2	0,57*	0,65*	0,49	0,55*	1,00		
Pv2 Ex r2 f4	0,06	0,19	0,11	0,19	0,76*	1,00	
Pv2 Ex r2 f6	0,00	0,00	0,02	0,05	0,29	0,62*	1,00

*Coeficiente de correlação de Pearson $p < 0,05$.

Em seguida, serão apresentados os resultados da raiz Pv2 r2 f4, a título de exemplo do que foi realizado em todas as fatias desta e das outras árvores. A Tabela 7 e Figura 30a contém os dados da largura dos anéis de crescimento de três raios e a média entre eles, a porcentagem de lenho tardio e excentricidade de cada um dos anéis.

Tabela 7 – Dados de largura do anel, porcentagem de lenho tardio, excentricidade e sinal da excentricidade da amostra Pv2 Ex r2 f4

Ano	Largura do anel (mm)				Lenho tardio (%)	Excentricidade (%)	Sinal
	Raio1	Raio2	Raio3	Média			
2000	0,78	0,83	0,57	0,73	35,23	30,71	1
2001	1,14	1,42	0,98	1,18	25,97	31,15	1
2002	1,42	1,52	1,04	1,33	38,1	31,61	1
2003	1,52	1,69	1,31	1,51	60,08	22,47	0
2004	1,32	1,44	1,43	1,40	58,58	8,02	0
2005	1,69	1,31	1,35	1,45	41,52	22,54	0
2006	1,41	1,32	1,05	1,26	39,99	25,07	0
2007	2,22	0,96	2,34	1,84	72,56	59,21	2
2008	3,10	1,33	3,55	2,67	64,13	62,29	2
2009	2,21	0,83	1,33	1,46	73,32	62,73	2
2010	3,86	1,11	1,65	2,21	84,46	71,14	3
2011	3,11	2,44	0,29	1,95	81,38	87,97	3
2012	1,05	1,03	0,15	0,75	46,86	85,3	3
2013	1,17	0,54	0,01	0,86	27,52	99,1	3

Os dados revelam poucas mudanças nos parâmetros avaliados até o ano de 2006. Do ano 2006 para o 2007, observa-se um aumento da largura media, porcentagem do lenho tardio e excentricidade. A largura média dos anéis de crescimento aumentou 46% (de 1,26 mm a 1,84 mm), a porcentagem do lenho tardio cresceu 80% (de 40 a 72,56 %)

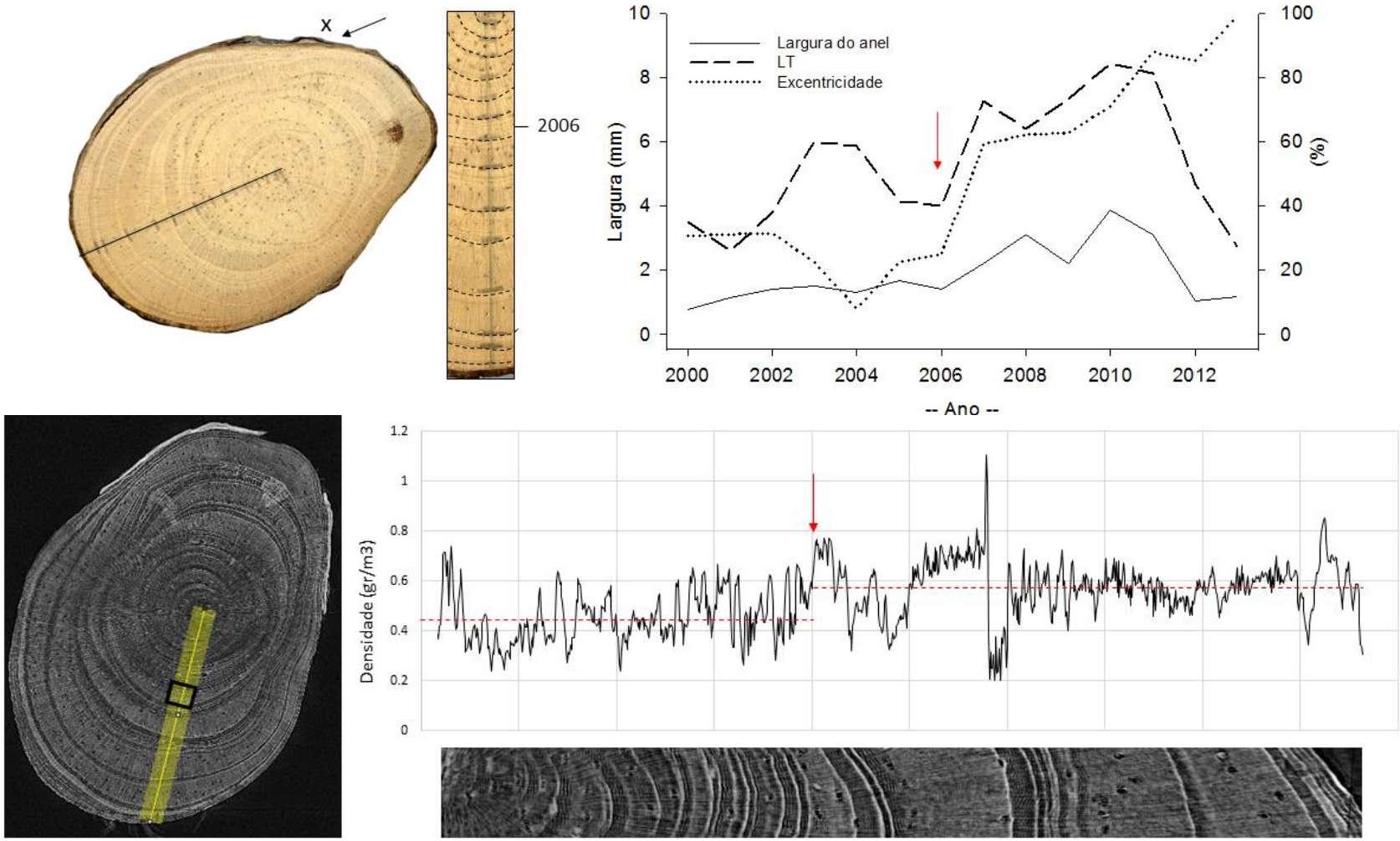


Figura 30- a) Amostra e seção de Pv2 Ex r2 f4 junto com o gráfico que representa a largura do anel, lenho tardio (LT) e excentricidade. b) Imagem de raio X da amostra junto com o gráfico da densidade aparente da madeira. A letra X indica a parte superior da amostra. A seta preta indica a direção do fluxo da água na voçoroca. A seta vermelha representa o ano da exposição. A linha tracejada vermelha representa a média da densidade do lenho

e a excentricidade passou de 25,07 a 59,21% (Tabela 7 e Figura 30a). O sinal da excentricidade, classificado como muito forte, indica que a mudança do índice da excentricidade na amostra foi significativa, sendo de 0-0-2-2 para os anos 2005-2008 (Tabela 7). Nos parâmetros estudados ocorrem variações ao longo dos anos, porém, considerou-se para estimar o ano de exposição aquelas que eram acompanhadas pela mudança de dois ou mais variáveis. Nesta amostra, o aumento das três variáveis ocorrendo juntas indica, de forma evidente, uma mudança no crescimento na raiz, possivelmente, devida à sua exposição. Portanto, o ano da exposição da amostra Pv2 Ex r2 f4 foi assinalado em 2006, ano anterior às mudanças. Estas mudanças (aumento do lenho tardio, largura e excentricidade) já foram relacionadas com o primeiro ano de exposição por outros autores (BODOQUE et al., 2011b; HITZ et al., 2008b; STOFFEL et al., 2013b).

No anel de crescimento da amostra referente ao ano de 2007 pode ser observado o lenho de compressão da madeira, caraterizado pelo incremento do lenho tardio, devido ao escurecimento das traqueídes pelo engrossamento das paredes celulares e desenvolvimento excêntrico dos anéis de crescimento. O crescimento excêntrico ocorreu no sentido inferior e esquerdo da raiz, ou seja, orientada para o solo e no lado contrário ao local onde a raiz recebia o impacto do fluxo hídrico (Figura 30a). A explicação para este comportamento reside no fenômeno denominado gravitropismo, que é o processo pelo qual a gravidade concentra determinados hormônios da planta que redireciona o crescimento das raízes para o solo (AZCÓN-BIETO; TALÓN, 2000; CASSAB; SÁNCHEZ-GUEVARA, 2007). Desta forma, após a exposição o crescimento da raiz Pv2 Ex r2 f4 ocorreu de forma excêntrica para baixo procurando condições mais favoráveis de crescimento oferecidas pelo solo e evitando o atrito do fluxo da agua e detritos.

Outra variável que facilitou a determinação do ano de exposição foi a densidade do lenho. Na Figura 30b pode ser observado os valores da densidade ao longo do perfil selecionado. As partes de cores mais claras na imagem indicam áreas com maior densidade, a qual corresponde ao lenho tardio. As partes mais escuras mostram áreas com densidade menor, identificando o lenho inicial. No gráfico da densidade aparente da madeira, nota-se diferenças entre o período anterior ao ano da exposição e o período após da exposição. Os maiores valores da densidade acontecem após o ano marcado como sendo o primeiro ano de exposição. Além disso, cabe destacar que as imagens de raio X serviram como ferramenta complementar na identificação dos anéis de crescimento e diferenciação do lenho inicial e tardio dentro do anel.

Ambas as fatias da raiz 2 da árvore Pv2 apresentaram mudanças nas variáveis estudadas no ano 2007, o que quer dizer que o ano da exposição da raiz foi 2006. Por outro lado, os resultados das análises na raiz 1 da mesma árvore assinalava mudanças de, pelo menos, duas variáveis no ano 2010, o que define o ano de exposição em 2009 (Figura 31). Neste ano, houve um acréscimo na porcentagem de lenho tardio, excentricidade e diminuição na largura média do anel. Ainda, na Figura 31 pode ser observado o efeito negativo da excentricidade sobre a sincronização da largura das duas raízes a partir do ano de exposição, pois a partir deste ano as tendências de crescimento entre as raízes se desestabilizam.

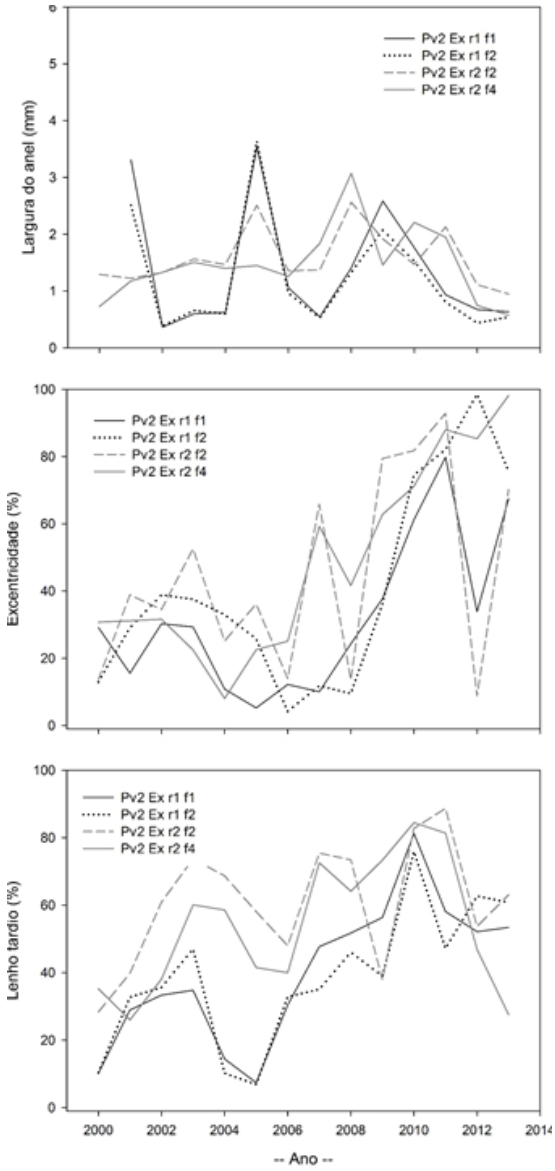


Figura 31 - Largura do anel, excentricidade e lenho tardio das raízes expostas de Pv2

A diferença do ano de exposição das raízes da mesma árvore é devida à posição que ocupa a raiz dentro da voçoroca e à dinâmica do processo erosivo. A profundidade das fatias

em relação ao fundo da voçoroca são: raiz 1 com alturas entre 14 e 19 cm (Pv2 Ex r1 f1, Pv2 Ex r1 f2) e raiz 2 com alturas entre 22 e 19 cm (Pv2 Ex r2 f2 e Pv2 Ex r2 f2) (Figura 32).

Os resultados do ano da exposição das raízes 1 e 2 (ano 2009 e 2006, respectivamente) e a sua relação com a altura dentro da voçoroca confirma que as raízes situadas mais próximas ao fundo da voçoroca, ou seja, com menor altura relacionada à superfície atual do fundo da voçoroca, sofreram os processos erosivos durante os anos mais recentes (WROŃSKA-WAŁACH, 2009). Porém, como não existe uma grande diferença entre as alturas das fatias, concluiu-se que a diferença de três anos da exposição é uma combinação dos dois processos, 1) o remonte da voçoroca e 2) aprofundamento dela, ambos relacionados com a dinâmica de abertura da voçoroca. O processo de voçorocamento está caracterizado pela erosão remontante (MORGAN, 2005a), o qual pode ser observado pelos resultados das raízes, onde a raiz 1 situava-se mais próxima à cabeça atual da voçoroca (Figura 32), por isso o ano de exposição pode ter sido mais recente.

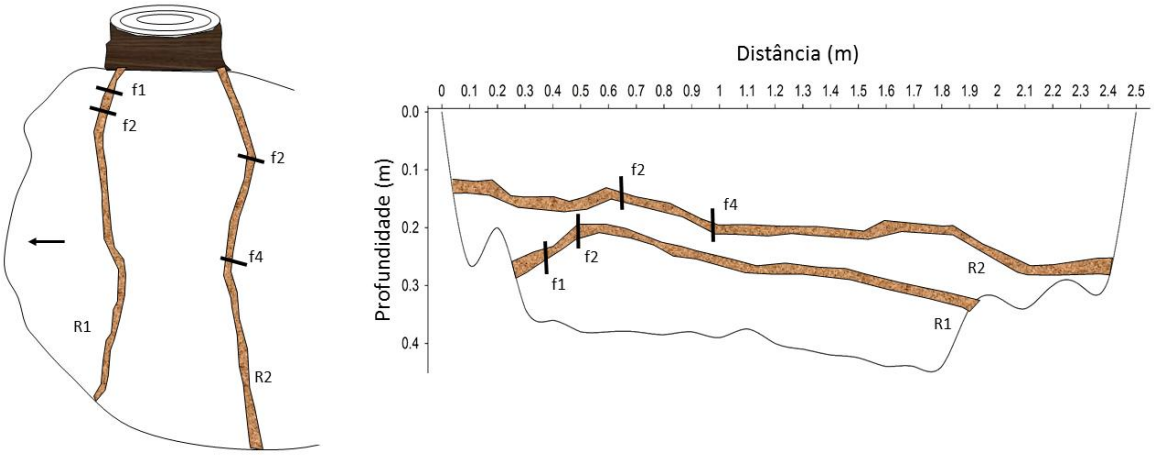


Figura 32 – Gráfico esquemático do posicionamento das raízes e das fatias estudadas da árvore Pv2, dentro da voçoroca. Seta preta indica o sentido da abertura da voçoroca

Os resultados da raiz Pv12 Ex r2 f1 serão apresentados a seguir como segundo exemplo desta análise dendrogeomorfológica. Escolheu-se exibir esta raiz como exemplo devido as notáveis características que apresenta. Esta árvore situa-se na parte inferior da área onde ocorrem os maiores processos erosivos. Na Figura 33a pode ser observado que a excentricidade se inicia no ano 1997 com sinal forte (0-0-1-3) a qual se mantém com porcentagens acima do 50% até o final da amostra. Porém, não existem mudanças no tamanho do lenho tardio até o ano 2001. Portanto, a mudança desta variável e a porcentagem elevada de excentricidade neste ano fez considerar que a exposição da raiz ocorreu no ano 2000. Anterior ao ano 2000, apareceram os anéis de crescimento mais excêntricos, mantendo um

mesmo padrão geométrico. Entretanto, a partir deste ano, surgem anéis de largura variável, com anomalias geométricas que os diferenciam dos anéis dos anos anteriores. Possivelmente, as mudanças anteriores ao ano de exposição indicam a proximidade da raiz com a superfície (HITZ et al., 2008b). As raízes começam a sofrer mudanças anatômicas quando a espessura da camada de solo acima delas é menor a 3 cm (CORONA et al., 2011).

Como pode ser observado no gráfico (Figura 33a), também existe um importante aumento da densidade da madeira a partir do ano da exposição. Na imagem de raio X, percebe-se cores mais claras a partir do ano de exposição, indicando valores elevados da densidade o que reflete no aumento do lenho tardio, tanto na sua proporção dentro do anel quanto nos valores máximos de densidade (Figura 33b). Isto indica o aparecimento de lenho de compressão por causa da exposição da raiz. Nesta imagem de raio X, observa-se de forma nítida várias mudanças na orientação do crescimento da raiz, podendo distinguir até três fases: a) primeira fase, onde os anéis de crescimento crescem para a parte inferior esquerda; b) segunda fase, os anéis de crescimento são orientados para a parte superior e inferior direita; c) terceira fase, os anéis voltam a crescer para a parte inferior esquerda. Observa-se uma elevação da medula da raiz, isto ocorre para balancear o incremento da raiz na parte inferior com o fim de ajustar a curvatura da raiz (COUTTS, 1989; POLACEK; KOFLER; OBERHUBER, 2006). Estas diferentes fases podem indicar a adaptação da morfologia da raiz às diferentes direções dos fluxos hídricos e às condições que sucederam ao longo do tempo, em função da topografia da voçoroca.

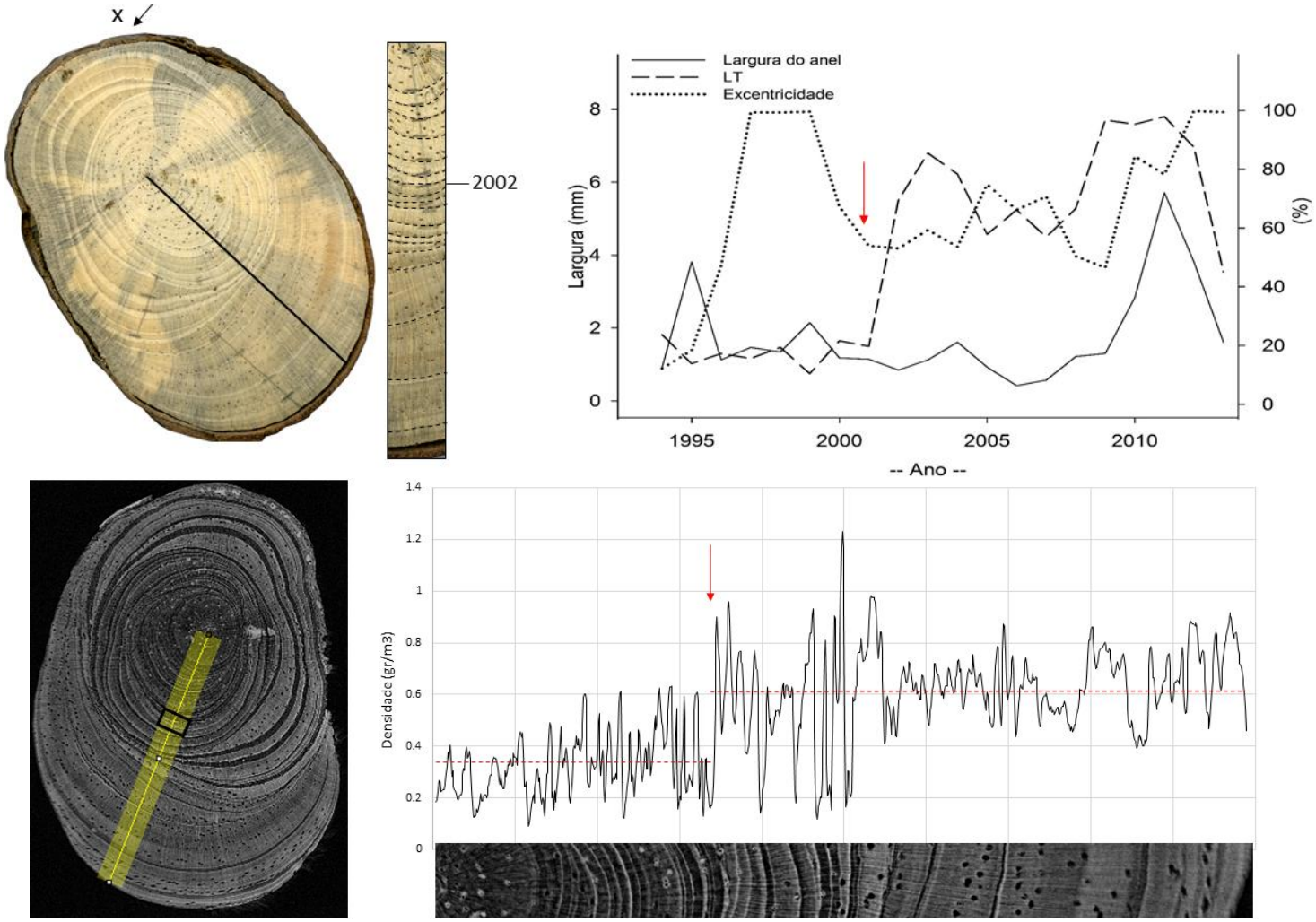


Figura 33 - a) Amostra e seção de Pv12 Ex r2 f1 junto com o gráfico que representa a largura do anel, lenho tardio (LT) e excentricidade. b) Imagem de raio X da amostra junto com o gráfico da densidade aparente da madeira. A letra X indica parte superior da amostra. A seta preta direção do fluxo da água na voçoroca. A seta vermelha representa o ano da exposição. Linha tracejada vermelha representa a média da densidade do lenho

A Figura 34 mostra duas imagens obtidas com o microscópio óptico, mostrando as alterações ocorridas na anatomia dos anéis de crescimento, antes e depois da exposição. A Figura 34 apresenta traqueídes de tamanho aparentemente maior e de coloração clara nos anéis anteriores à exposição da raiz. Mesmo que este trabalho não estudou esta variável, a bibliografia reporta que o tamanho do lúmen das traqueídes do lenho inicial em gimnospermas é considerado um indicador anatômico importante nas mudanças de raízes expostas (HITZ et al., 2008a). Nos anos posteriores à exposição, as traqueídes, aparentemente, têm tamanho menor e são mais arredondadas, exibem a parede celular mais grossa com grande conteúdo de lignina, evidenciado pela coloração escura e aumento do espaço intercelular entre as fileiras de traqueídes reforçados com lignina (Figura 34). Estas características são alguns dos atributos próprios do lenho de compressão, já mencionados por alguns autores (GARCÍA ESTEBAN, 2003; STOFFEL; KLINKMÜLLER, 2013; TIMELL, 1986b).

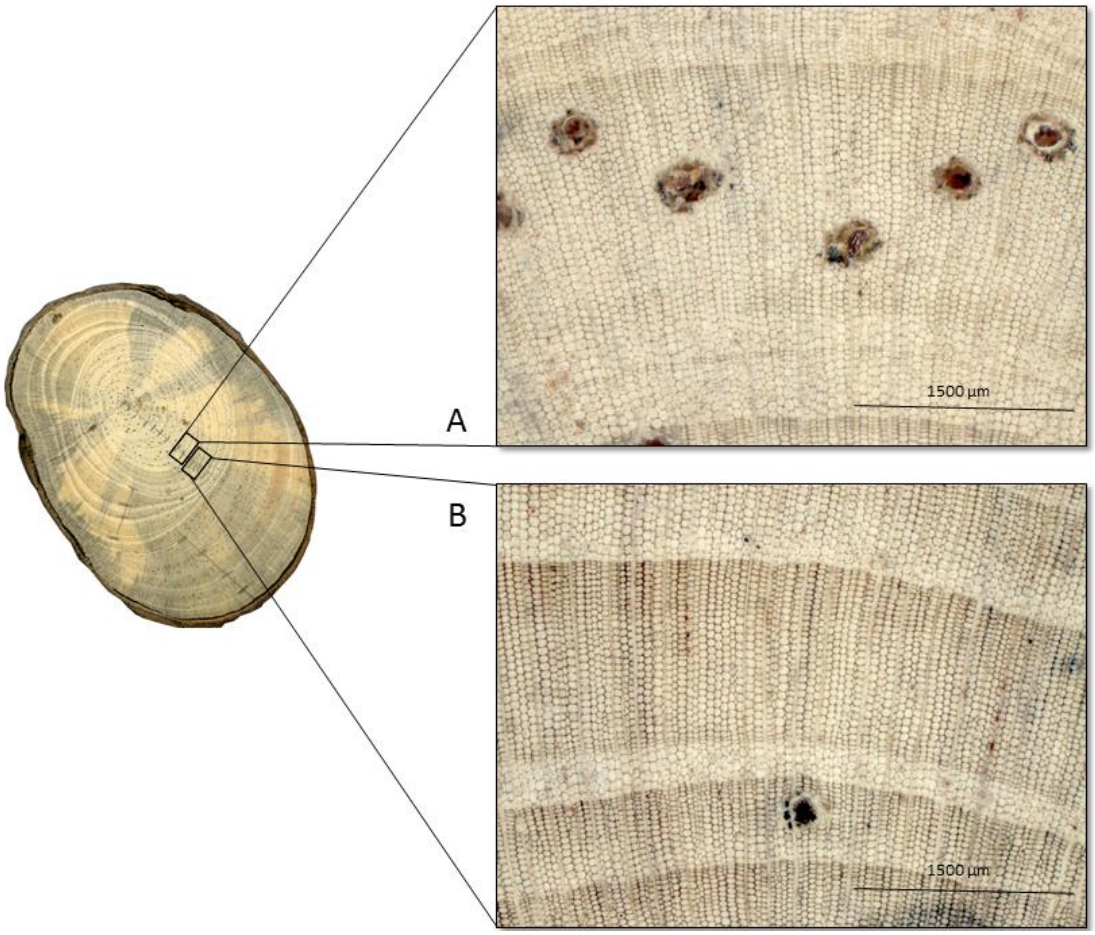


Figura 34 – Imagem detalhada da anatomia dos anéis de crescimento da raiz antes (A) e após a exposição (B)

Como último exemplo, serão apresentados os dados da raíz Pv11 Ex r1 f10 (Figura 35). Esta raiz serve como exemplo devido às características morfológicas particulares que apresenta e à localização da raiz, já que se situa na parte mais ampla e profunda da voçoroca próximo do degrau de erosão (Figura 14). Portanto, espera-se alterações maiores na morfologia da raiz.

Na Figura 35a pode ser observado que as variáveis da excentricidade dos anéis e a porcentagem de lenho tardio sofreram diferentes mudanças ao longo da raiz. Distinguem-se dois períodos do aumento da excentricidade, sendo o primeiro correspondente aos anos 1993-1996 e o segundo entre 2002 e 2006. No primeiro, o índice de excentricidade tem um sinal fraco (1-1-2-3) e porcentagem do lenho tardio entre 30 e 50%. O segundo período tem valores da excentricidade maiores com um sinal muito forte (0-0-3-2) acompanhado por um aumento notável da porcentagem do lenho tardio.

Observa-se claramente dois períodos distintos no gráfico da densidade proveniente da imagem de raio X (Figura 35b). Os valores de densidade da madeira pertencem ao calo de cicatrização, o qual está associado com uma densidade maior no lenho tardio (BOLLSCHWEILER et al., 2008). Observa-se que este tecido aparece aliado a uma cicatriz, sendo também uma área de maior produção de resina como resposta ao ferimento, possivelmente, provocada pelo impacto de detritos, como já assinalaram outros autores (BOVI, 2013; SCHWEINGRUBER, 1993; STOFFEL; KLINKMÜLLER, 2013). Após o tecido caloso ocorre o aparecimento de madeira de compressão. Assim, todas as diferenças e características permitiram marcar o ano de exposição da raiz em 2001, ou seja, marcando o início do segundo período.

Levou-se em consideração outras evidencias que ajudaram a estimar a exposição desta fatia no ano de 2001. Por exemplo, a árvore Pv15 situa-se poucos metros mais a jusante e na frente da árvore Pv11, com as raízes expostas na parte aberta da voçoroca (mapa topográfico Figura 16). Portanto, o ano da exposição das raízes das duas árvores deveriam ser aproximados.

Segundo os resultados das análises realizadas nas raízes da árvore Pv15, as mudanças anatômicas surgiram a partir do ano 2001. Desta forma, como era esperado, o segundo período da exposição da raiz de Pv11 coincide com o ano de exposição da árvore Pv15.

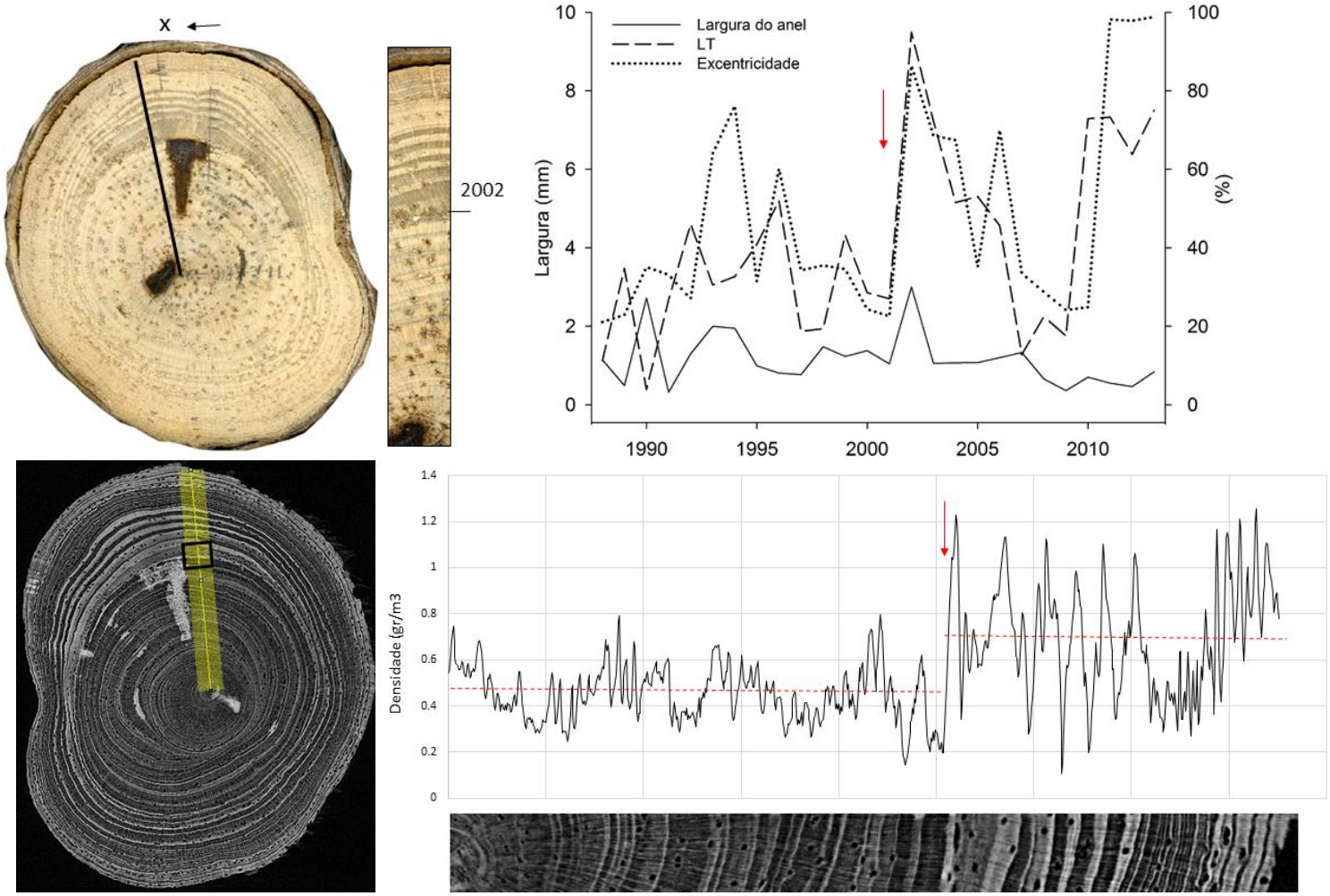


Figura 35 - a) Amostra e seção de Pv11 Ex r1 f10 junto com o gráfico que representa a largura do anel, lenho tardio (LT) e excentricidade. b) Imagem de raio X da amostra junto com o gráfico da densidade aparente da madeira. X indica parte superior da amostra. A seta preta direção do fluxo da agua na voçoroca. A seta vermelha representa o ano da exposição. A linha tracejada vermelha representa a média da densidade do lenho

O primeiro período de excentricidade levantou o questionamento sobre o porquê de seu aparecimento. Observou-se que todas as fatias das raízes expostas de Pv11 apresentaram vários períodos de excentricidade, sendo o primeiro período ao redor do ano 1990 para todas as raízes. Deve-se salientar que anéis de crescimento com sinais importantes de excentricidade foram observados também nas raízes enterradas da mesma árvore (Figura 36). Conforme a Figura 36, distingue-se que no início a raiz tinha uma morfologia concêntrica própria de raízes enterradas, contudo, após um período determinado, o padrão de crescimento mudou, ocasionando o desenvolvimento de anéis de crescimento excêntricos. Inclusive, a amostra da direita na Figura 36 exibe a presença de uma cicatriz e produção de resina no limite das duas fases.

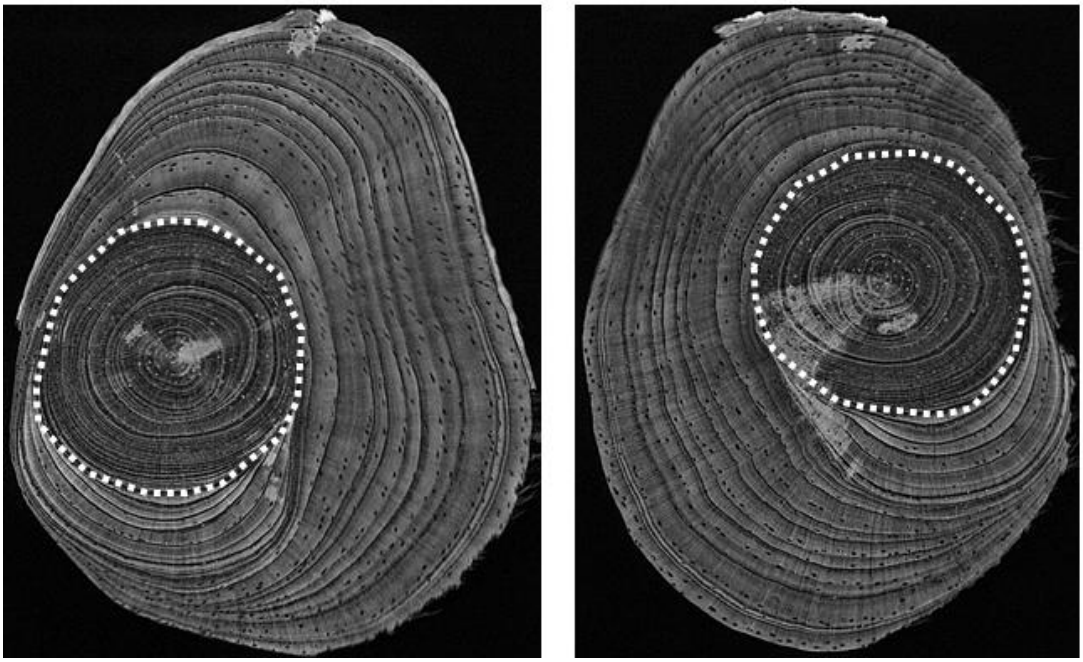


Figura 36 - Imagem de raio X das amostras das raízes enterradas da árvore Pv11. Linha descontinua em branco delimita a fase concêntrica da raiz

Esta mudança no padrão de crescimento nas raízes enterradas, semelhante ao que ocorre em raízes expostas, ocorreu nos anos próximos ao ano 1990, definindo o primeiro período de mudança destas raízes. Estes resultados tornam-se importantes e conferem a existência de um fenômeno que pode causar alterações nas raízes quando enterradas.

Durante anos foi muito controversa a existência de madeira de compressão em raízes enterradas, e ainda existem poucos estudos que mostram este fenômeno (TIMELL, 1986b). FAYLE (1968) examinou raízes expostas e enterradas de árvores, reportando que somente as raízes enterradas na base do caule continham madeira de compressão como continuação desta madeira no caule da árvore. A proximidade das raízes ao caule poderia ter influenciado as

raízes. Entretanto, durante a coleta, respeitou-se o reportado em literatura, e a coleta procedeu-se a um metro de distância entre a raiz e o caule seguindo a metodologia proposta pelo autores GÄRTNER (2007) e HITZ et al. (2008a).

Levou-se em consideração a situação geográfica da árvore com o intuito de dar resposta às alterações da anatomia da raiz enterrada. Como já foi mencionado, existe uma grande ocorrência de processos de erosão subsuperficial (*pipings*) na área de estudo (mapa topográfico Figura 14). Considerando que a árvore Pv11 está localizada na zona com o maior número de *pipings*, é provável que a formação dos *pipings* possam ter causado as modificações que aparecem no primeiro período, quando as raízes estavam enterradas.

Informações sobre a relação entre as mudanças anatômicas em raízes e a ocorrência de *pipings* são escassas. AGUSTIN e ARANHA (2006) defendem que os *pipings* são formados por dutos ou túneis a partir do carregamento de material ou mesmo através da remoção de componentes do solo por solução. Por outro lado, as principais causas na mudança anatômica das raízes são promovidas por um estresse mecânico e/ou mudanças associada ao contato com a atmosfera, seja pela luz, temperatura, umidade ou a redução da pressão da camada do solo (CORONA et al., 2011; GÄRTNER; SCHWEINGRUBER; DIKAU, 2001; HITZ et al., 2008a). Portanto, as raízes poderiam ter experimentado alterações na anatomia devido ao impacto do fluxo da água junto com os detritos que ocorre no interior dos *pipings* e por modificações no ambiente pela remoção do solo como a temperatura, pressão ou umidade. Considerando também a própria desestabilização do solo produzida em áreas afetadas pela erosão. Isto poderia explicar o surgimento da mudança anatômica em todas as raízes de Pv11 próximo ao ano 1990.

Finalmente, as raízes analisadas neste tópico refletem a metodologia desenvolvida em todas as fatias com o objetivo de estimar o ano de exposição e entender a dinâmica dos processos erosivos que ocorrem na área de estudo.

4.3 Dinâmica dos processos erosivos na área de estudo

Este tópico mostrará os resultados das análises de todas as raízes das árvores estudadas de maneira global com o intuito entender a dinâmica dos processos erosivos da área. Os resultados dos anos de exposição das diferentes raízes se apresentam de forma esquemática na Figura 37 e de forma mais completa nas Tabela 8, 9, 10 e 11.

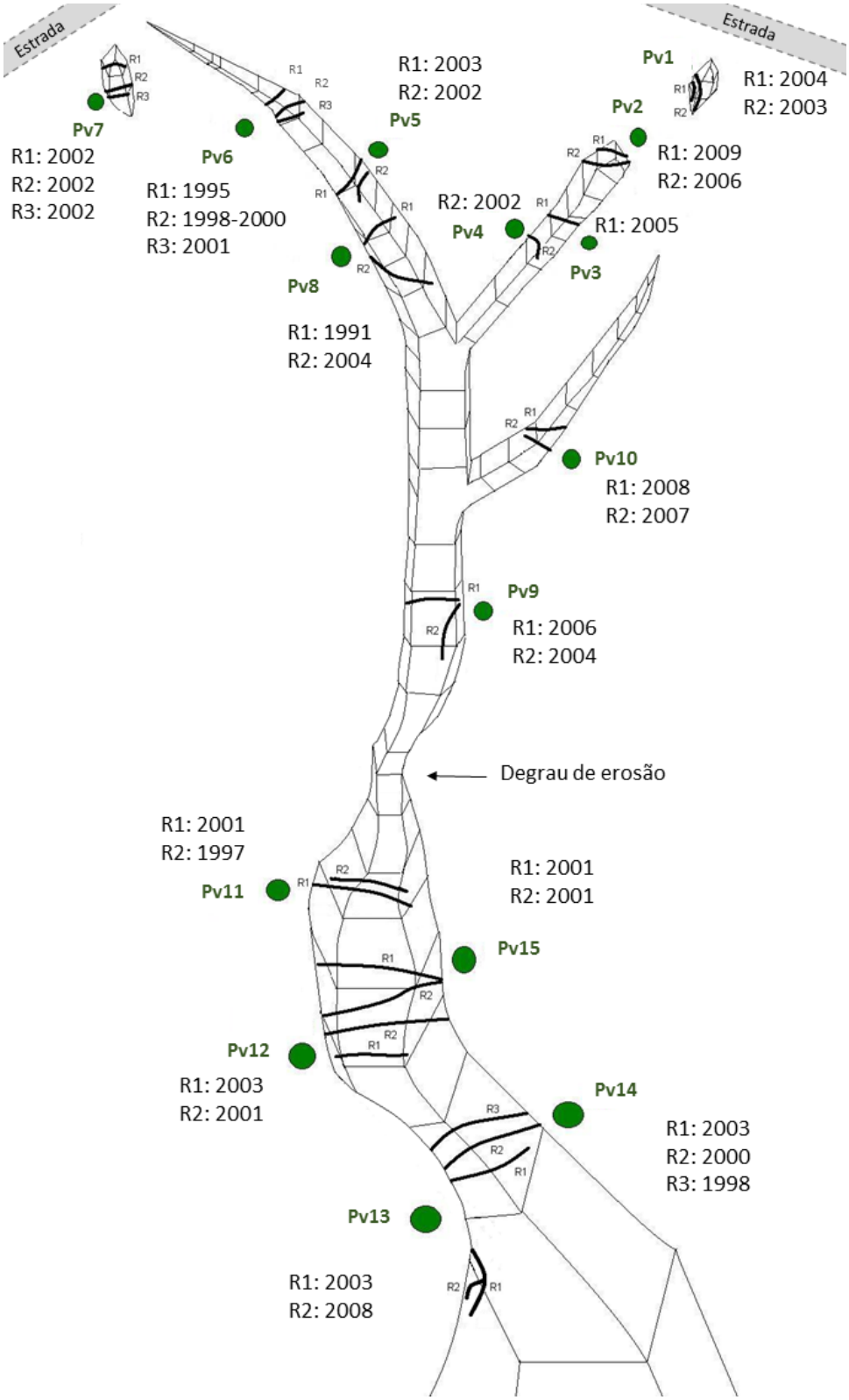


Figura 37 – Representação esquemática das árvores na área de estudo indicando o ano de exposição das raízes

Pv1 e Pv7 são árvores que se localizam em sistemas de voçorocas independentes e desconectadas da voçoroca principal (Figura 37). Em Pv1 produziram-se mudanças anatômicas destacando a diminuição do tamanho do anel (Tabela 8). As análises indicaram o

ano de exposição da raiz 1 e raiz 2 como sendo 2004 e 2003, respectivamente. Estas datas são coerentes com os dados da posição das raízes na voçoroca, a raiz 1 situava-se mais próximo do fundo da voçoroca do que a raiz 2. A maioria das raízes de Pv7 manifestaram mudanças importantes em todas as variáveis, largura do anel, excentricidade com sinal forte, aumento do lenho tardio e densidade do lenho (Tabela 9). Todas as raízes indicaram ano de exposição em 2002. Ambas as árvores localizam-se em voçorocas formadas como consequência de estradas florestais. No caso das raízes de Pv7 localiza-se próxima a afundamentos provocados pelos *pipings* e acelerados pela agua proveniente da estrada. As estradas florestais não pavimentadas são uma das principais causas de erosão hídrica (GRIEBELER et al., 2005). CAMARGO CORRÊA, ROLOFF e MALINOVSKI (2005) advertem da vulnerabilidade das vias à erosão hídrica causada durante a sua construção e utilização devido à retirada da cobertura vegetal, à movimentação do solo e à compactação de seu leito. A estrada induz a uma concentração do escoamento superficial e um desvio de escoamento concentrado para outras áreas desenvolvendo a formação de voçorocas (NYSSEN et al., 2006). A construção de estradas perturba o equilíbrio hidrogeomorfológico das áreas próximas (NYSSEN et al., 2006; THOMAZ; VESTENA; RAMOS SCHARRÓN, 2014).

As árvores Pv2, Pv3 e Pv4 situam-se numa das ramificações da voçoroca. Todas as raízes das árvores apresentaram mudanças anatômicas indicadas pela excentricidade forte e aumento do lenho tardio, inclusive algumas desenvolveram lenho de reação após da exposição da raiz (Tabela 8). Na Figura 37 pode ser observada a localização das árvores na voçoroca e o ano da exposição das raízes. Estes resultados indicam que nesta parte a voçoroca, classificada como efêmera, teve um desenvolvimento em direção à montante da área expondo primeiro as raízes da árvore Pv4 seguido de Pv3 e Pv2. Pv2, que é a árvore localizada na cabeça da voçoroca, apresenta os anos de exposição das suas raízes mais recentes (anos 2006 e 2009), seguido de Pv3 (ano 2005) e Pv4 situada na parte inferior com as raízes com datas de exposição mais antigas (ano 2002).

O sistema de voçorocamento parece mais complexo quando se analisam as raízes das árvores Pv5, Pv6 e Pv8. As raízes de Pv6 mostraram algumas dificuldades porque todas apresentaram índices de excentricidade elevados desde o início.

Tabela 8 - Resultados das raízes expostas indicando se houve correlação das amostras com as fatias da mesma árvore tanto enterradas quanto expostas, critério seguido para a determinação do ano da exposição, altura da fatia com relação ao fundo da voçoroca

Amostra	Correlação	Critério	Ano da exposição	Altura do solo (mm)
Pv1 EX r1 f1	Sim	Muda o padrão de crescimento. Anéis inapreciáveis em um raio da amostra muitas flutuações de densidade a partir de 2005. Lenho tardio pouco destacável.	2004	330
Pv1 EX r1 f4	Sim		2004	250
Pv1 EX r2 f1	Sim	Excentricidade com sinal forte a partir de 2005. Diminuição da largura.	2004	350
Pv1 EX r2 f3	Sim	Mudança do padrão. Diminuição da largura 2004. Excentricidade sinal moderado.	2003	580
Pv2 EX r1 f1	Sim	Excentricidade com sinal forte e aumento lenho tardio.	2009	140
Pv2 EX r1 f2	Sim		2009	190
Pv2 EX r2 f2	Sim	Tanto excentricidade quanto o lenho tardio aumentam no 2007. Madeira de compressão.	2006	220
Pv2 EX r2 f4	Sim		2006	190
Pv2 EX r2 f6	Sim		2006	180
Pv3 EX r1 f1	Sim	Excentricidade forte. Lenho tardio elevado em toda a amostra.	2005	250
Pv3 EX r1 f6	Sim		2005	340
Pv4 EX r2 f1	Sim	Excentricidade com sinal muito forte e aumento do lenho tardio. Madeira de compressão.	2002	240
Pv4 EX r2 f4	Sim		2002	160
Pv5 EX r1 f2	Sim	Excentricidade com sinal moderado. Diminuição importante na largura do anel.	2003	567
Pv5 EX r1 f3	Sim		2003	540
Pv5 EX r2 f2	Sim	Excentricidade forte. Diminuição na largura do anel. Cicatriz	2003	550
Pv5 EX r2 f4	Sim		2002	530

Tabela 9 - Resultados das raízes expostas indicando se houve correlação das amostras com as fatias da mesma árvore tanto enterradas quanto expostas, critério seguido para a determinação do ano da exposição, altura da fatia com relação ao fundo da voçoroca

Amostra	Correlação	Critério	Ano da exposição	Altura do solo (mm)
Pv6 EX r1 f1	Não	Excentricidade muito forte desde o início do crescimento da raiz. A raiz encontra-se na superfície da voçoroca.	1995	70
Pv6 EX r1 f4	Não		1995	850
Pv6 EX r2 f2	Não	Excentricidade desde os primeiros anéis de crescimento da raiz anterior á 1995. Mudança de padrão em 1998 com aumento da largura do anel. Portanto, o ano de exposição foi estimado a partir dos resultados da raiz 1 e 3 e da mudança na largura do anel.	1998 -2000	190
Pv6 EX r2 f4	Não			560
Pv6 EX r3 f1	Não	Excentricidade com sinal forte.	2001	330
Pv6 EX r3 f4	Não		2001	290
Pv7 EX r1 f1	Sim	Excentricidade com sinal forte, aumento do lenho tardio e diminuição da largura do anel. Madeira de compressão.	2002	290
Pv7 EX r1 f4	Sim		2002	270
Pv7 EX r2 f1	Sim	Excentricidade com sinal forte, aumento do lenho tardio e diminuição da largura do anel. Madeira de compressão.	2002	195
Pv7 EX r2 f2	Sim		2002	195
Pv7 EX r3 f1	Sim	Excentricidade com sinal fraco, aumento do lenho tardio e diminuição da largura do anel	2002	80
Pv7 EX r3 f5	Sim	Excentricidade forte e diminuição da largura do anel	2002	195
Pv8 EX r1 f1	Sim	Anéis muito excêntricos o que dificultou a sua identificação. Centro concêntrico. Deformação aparece a partir do ano 1992. Presença de cicatrizes.	1991	580
Pv8 EX r1 f3	Sim		1991	1000
Pv8 EX r2 f2	Sim	Excentricidade com sinal moderado e aumento do lenho tardio em 1996. Mudança do padrão e diminuição da largura em 2005.	2004	100
Pv8 EX r2 f3	Sim		2004	160

A raiz 1 está localizada na parte superior da voçoroca, ou seja, próximo à superfície do terreno (Figura 16). As duas fatias estudadas apresentaram o ano de exposição em 1995 com excentricidade de sinal muito forte desde os primeiros anéis (Tabela 9). Porém, a fatia 1 (posicionada na lateral da voçoroca) foi coletada a 7 cm do fundo da voçoroca enquanto a fatia 4 (posicionada na parte central da voçoroca) a 85 cm. Isto pode indicar que a raiz foi exposta rapidamente por um processo de voçorocamento intensivo e rápido. Contudo, após da exposição da raiz, a dinâmica erosiva mudou o fluxo da enxurrada para a seção central. Isto gerou diferença entre as alturas das fatias e ajudou a entender que em um determinado momento a voçoroca começou a aprofundar e erodir mais na parte central (lugar da fatia 4) do que na lateral da voçoroca (lugar da fatia 1). Observou-se que a fatia 4 tinha índices de excentricidade maiores do que a fatia 1, possivelmente, porque foi mais afetada pelos processos erosivos que se concentraram nesta parte central. A raiz 2 mostrou excentricidade desde os primeiros anéis de crescimento anteriores ao ano 1995 (ano de exposição da raiz 1). A exposição desta raiz não poderia ser anterior a 1995 já que a raiz 2 localizou-se a uma altura intermediaria entre as raízes 1 e 3 (Tabela 9). Portanto, o ano de exposição teve que ser estimado a partir dos resultados da raiz 1 e 3 e da mudança na largura do anel desta raiz sendo considerado entre os anos 1998-2000.

As raízes da árvore Pv5 manifestaram mudanças anatômicas especialmente marcadas pela diminuição da largura do anel no ano 2002 e 2003 (Tabela 8). Quando se relacionam os dados de Pv5 com Pv6 e as suas posições geográficas, destaca-se que as datas de exposição das raízes de Pv6 são mais antigas do que as raízes de Pv5 (Figura 37). Considerando que Pv6 está situada à montante de Pv5, poderia se dizer que o avanço desta parte da voçoroca foi promovido pela construção da estrada o que provocou que a erosão fosse abrindo a voçoroca da parte superior para a parte inferior. A árvore Pv8 apresentou resultados dispares entre as suas raízes (Figura 37 e Tabela 9). O ano de exposição da raiz 2 foi definido no ano 2004 determinado pela mudança do padrão de crescimento dos anéis. A raiz 1, que já foi apresentada anteriormente (Figura 27a) como exemplo de amostras excêntricas, apresentou serias dificuldades na sua datação e identificação de anéis verdadeiros. Observou-se uma mudança na excentricidade com sinal muito forte a partir do ano 1992 (Tabela 9). Este dado não tem concordância com os dados das raízes das árvores anteriores nem com a raiz 2 de Pv8. Portanto, existem duas possíveis explicações; a primeira a possibilidade de uma datação errônea devido à presença de anéis falsos, ou que a raiz estivesse sendo afetada por processos de erosão subsuperficial o que provocou a sua excentricidade quando enterrada.

A árvore Pv9 situa-se no canal principal da voçoroca e numa área onde pode se apreciar sinais de sedimentação, neste lugar a voçoroca e menos profunda e mais larga. As raízes desta árvore apresentaram modificações anatômicas que ajudaram a determinar o ano da exposição das raízes correspondendo aos anos 2006 e 2004 para a raiz 1 e raiz 2, respectivamente (Tabela 10 e Figura 37). Estes dados apresentam correspondência temporal e espacial com os dados das raízes das árvores anteriores. Por outro lado, a árvore Pv10 forneceu informações que indicaram que o braço da voçoroca onde está localizada foi aberto mais recentemente, já que, as raízes mostraram alterações na madeira no ano 2008 e 2007 (Tabela 10).

Em resumo, a cronologia da exposição das raízes indicou que a estrada provocou a abertura da parte superior da voçoroca desde a parte mais alta da área de estudo desenterrando primeiramente as raízes dos indivíduos das áreas superiores próximas à estrada, incidindo no aprofundamento da voçoroca durante o trajeto e depositando o material na parte final. Portanto, os dados mostram que o canal principal é aquele onde se situam as árvores Pv6, Pv5, Pv8 e Pv9 provocada pela ação da estrada, e como consequência deste canal apareceram a formação de dois braços que evoluíram por erosão remontante, um onde se localizam as árvores Pv4, Pv3 e Pv2 e outro ramal com a árvore Pv10 que é o mais recente (Figura 37). Além disso, a agua proveniente da estrada poderia aumentar o fluxo subsuperficial de agua e, portanto, influenciar a evolução da voçoroca.

A árvore Pv11 já foi mencionada anteriormente por ter excentricidade elevada nas suas raízes. Deste modo, foi determinado o ano de exposição das duas raízes especialmente pela presença de madeira de compressão e cicatrizes (Tabela 10). Os anos de exposição estimados para as raízes 1 e 2 foram 2001 e 1997, respectivamente. A diferencia de altura e posição entre as fatias indicam que a voçoroca se iniciou pela parte esquerda, correspondente a área com maior concentração de pipings (Figura 14), e depois expandiu para o lado direito. A árvore Pv15 não apresentou mudanças tão abruptas na excentricidade, porém, o lenho tardio e a diminuição do anel indicaram o ano de exposição das raízes em 2001 (Tabela 11).

Tabela 10 - Resultados das raízes expostas indicando se houve correlação das amostras com as fatias da mesma árvore tanto enterradas quanto expostas, critério seguido para a determinação do ano da exposição, altura da fatia com relação ao fundo da voçoroca

Amostra	Correlação	Critério	Ano da exposição	Altura do solo (mm)
Pv9 EX r1 f3	Sim	Excentricidade com sinal forte e aumento do lenho tardio	2006	130
Pv9 EX r1 f5	Sim		2006	255
Pv9 EX r2 f2	Sim	Aumento na largura do anel. Excentricidade com sinal moderado. Lenho tardio elevado em toda a amostra.	2004	150
Pv9 EX r2 f4	Sim		2004	270
Pv10 EX r1 f3	Sim	Grande aumento na largura do anel e excentricidade com sinal fraco.	2008	565
Pv10 EX r1 f5	Sim		2008	625
Pv10 EX r2 f2	Sim	Excentricidade com sinal forte e aumento do lenho tardio.	2007	510
Pv10 EX r2 f3	Sim		2007	460
Pv11 EX r1 f1	Não	Excentricidade com sinal muito forte. Madeira de compressão. Cicatriz.	2001	660
Pv11 EX r1 f10	Não		2001	1960
Pv11 EX r2 f3	Não	Excentricidade alta em toda amostra. Presença de madeira de compressão.	1997	280
Pv11 EX r2 f5	Não		1997	330
Pv12 EX r1 f1	Não	Excentricidade com sinal muito forte. Aumento do lenho tardio	2003	1390
Pv12 EX r1 f4	Sim		2003	1280
Pv12 EX r1 f6	Sim		2004	1240
Pv12 EX r2 f1	Sim	Excentricidade com sinal muito forte. Aumento do lenho tardio. Lenho de reação. Aumento da largura do anel.	2001	1780
Pv12 EX r2 f3	Sim		2002	1750

Tabela 11 - Resultados das raízes expostas indicando se houve correlação das amostras com as fatias da mesma árvore tanto enterradas quanto expostas, critério seguido para a determinação do ano da exposição, altura da fatia com relação ao fundo da voçoroca

Amostra	Correlação	Critério	Ano de exposição	Altura do solo (mm)
Pv13 EX r1 f1	Sim	Excentricidade com sinal fraco e aumento do lenho tardio. Pouca mudança. Raiz na borda da voçoroca	2003	420
Pv13 EX r1 f3	Sim		2003	420
Pv13 EX r2 f1	Não	Excentricidade com sinal fraco. Lenho de reação e cicatriz. Raiz na borda da voçoroca	2008	350
Pv13 EX r2 f4	Não		2008	370
Pv14 EX r1 f6	Sim	Excentricidade com sinal muito forte e aumento do lenho tardio.	2003	1470
Pv14 EX r2 f1	Sim	Mudança na largura do anel, aumento do lenho tardio e excentricidade com sinal moderado em 2001. Excentricidade muito forte em 2004 com a presença de uma cicatriz grande que deforma toda a amostra.	2000	1720
Pv14 EX r2 f3	Sim		2000	1720
Pv14 EX r2 f6	Sim		2000	1710
Pv14 EX r3 f1	Não	Excentricidade com sinal muito forte e aumento do lenho tardio.	1998	1800
Pv14 EX r3 f4	Não		1998	1780
Pv15 EX r1 f3	Sim	Excentricidade com sinal fraco. Aumento do lenho tardio e diminuição da largura do anel.	2001	1980
Pv15 EX r1 f5	Sim		2001	1950
Pv15 EX r2 f3	Sim	Excentricidade com sinal fraco. Aumento do lenho tardio e diminuição da largura do anel.	2001	1680
Pv15 EX r2 f5	Sim		2001	1800

Nas raízes de Pv12 estimaram-se modificações na excentricidade e o lenho tardio, primeiramente na raiz 2 (ano 2001-2002) e segundo na raiz 1 (ano 2004-2003) correlacionadas com a posição e altura na voçoroca (Tabela 10 e Figura 37). As raízes de Pv14 foram expostas nas datas 2003, 2000 e 1998 (raiz 1, 2 e 3, respectivamente). A raiz 1 foi a raiz mais perto do fundo da voçoroca e, portanto, foi desenterrada mais recentemente. As raízes 2 e 3 deveria apresentar mudanças no mesmo ano, pois ambas estão situadas em alturas similares dentro da voçoroca. Mesmo assim, não houve correlações nas séries de crescimento da raiz 3 e das outras raízes da mesma árvore. A raiz 2 foi caracterizada pela presença de uma cicatriz que deformava as amostras (Figura 27a). Por último, as raízes da árvore Pv13 tinham modificações nos anéis de crescimento no ano 2003 e 2008, raízes 1 e 2, respectivamente. Tratam-se de anos recentes porque as raízes situavam-se na borda da voçoroca perto da superfície (Tabela 11) o que poderia indicar uma expansão lateral mais recente da voçoroca.

Segundo os resultados obtidos por BOVI (2013) na mesma área de estudo, as raízes do guapuruvu foram desenterradas em 1989 e 1992, estas árvores se encontram mais a jusante, a 40 metros aproximadamente da árvore Pv13. Os indivíduos de pinheiros estão localizados a montante dos indivíduos de guapuruvu e com datas de exposição das raízes posteriores a 1989. Consequentemente, o avanço da voçoroca. entre a árvore Pv11 e os guapuruvus estudados por BOVI (2013), está acontecendo de forma remontante. TOY, FOSTER e RENARD (2002) explicaram que o avanço de uma voçoroca ocorre pelo aprofundamento do fundo, pela ampliação mediante o retrocesso das paredes laterais e pelo remonte da cabeceira da voçoroca. Os resultados confirmaram que os três processos ocorrem na área. O fluxo erode a parte inferior das paredes de voçoroca e deixa a parte superior do solo sem sustento que depois desmorona. Porém, os resultados das raízes indicaram a ação de outras atividades erosivas. Observou-se que as raízes das árvores Pv11 e Pv15 foram desenterradas com anterioridade às raízes de Pv12, Pv13 e Pv14, indicando que o processo de voçorocamento está sendo influenciado pela atividade dos *pipings* que ocorrem na área do entorno destas árvores. E por isso que neste lugar a voçoroca atinge suas dimensões máximas. De forma semelhante ao que acontece na área de estudo, geralmente, os *pipings* encontram-se conectados uns com outros e de forma linear (ROMERO DÍAZ; MARIN SANLEANDRO; SANCHEZ SORIANO, 2011). Depois devido à perda de

resistência do material no processo de expansão do *piping*, o teto pode colapsar formando uma voçoroca. Existem muitos estudos que outorgam uma forte associação entre os processos de *piping* e a formação de voçorocas (FAULKNER, 2013; JONES, 2004; ROMERO DÍAZ et al., 2007; VERACHTERT et al., 2013), tanto no processo de recuo das cabeceiras, quanto ao alargamento das paredes das voçorocas, bem como à ampliação do número de ramificações (AGUSTIN; ARANHA, 2006).

Finalmente, considerando a totalidade da voçoroca pode ser apontado o que outros autores já descreveram. Segundo GUERRA, SILVA e BOTELHO (1999) existem grandes voçorocas que se formam como resultado da integração, ao longo do tempo, de dois tipos de sistemas de voçorocas: as conectadas e desconectadas da rede hidrográfica. Os sistemas desconectados avançam para montante e formaram um cone de dejeção a jusante, enquanto, os conectados expandem-se para montante em forma linear. Assim, no momento da integração forma-se um degrau o qual se associa ao aumento localizado do material erodido. Se for comparado isto como os resultados obtidos das raízes, pode se afirmar que está acontecendo um processo semelhante ao descrito acima na área de estudo. O setor da voçoroca entre as árvores Pv2 e Pv10, que se formou entre os anos 1995 e 2010, forma um sistema desconectado da rede hidrográfica. O setor mais a jusante da voçoroca, entre as arvores Pv11 e Pv15 e os guapuruvus do estudo de BOVI (2013), forma um sistema conectado à rede hidrográfica do rio Tijuco Preto. Os setores montante e jusante da voçoroca, que se formam por sistemas diferentes, se unem formando um degrau de erosão (Figura 37) típico deste processo.

O estudo de voçorocas é complexo e muito variável tanto na escala temporal quanto espacial, porém os resultados obtidos das raízes mediante o uso da dendrogeomorfologia permitiu entender e explicar a dinâmica do processo erosivo na voçoroca estudada. Portanto, a dendrogeomorfologia reafirma-se como uma ferramenta com grande potencial de datação de processos geomorfológicos em áreas de ambientes tropicais.

4.4 Análise da taxa de erosão

Para obter os resultados da taxa de erosão dentro da voçoroca, esta foi dividida em setores (Tabela 12 e Figura 38).

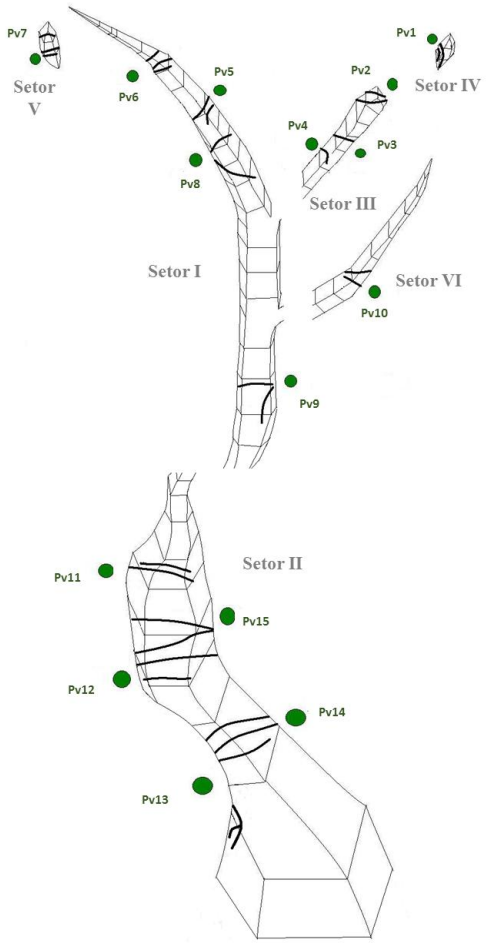


Figura 38 - Voçoroca dividida nos sectores I, II, III, IV, V e VI

O setor I (onde se localizam as árvores Pv5, Pv6, Pv8 e Pv9) teve uma taxa de erosão média, segundo o método de GÄRTNER (2007), de 30.0 mm/ano (Tabela 12 e Figura 38). Este valor é próximo aos valores dos setores III (onde se localizam as árvores Pv2, Pv3 e Pv4) e IV (onde se situa Pv1) que apresentam valores de 26.5 e 36.4 mm/ano, respectivamente. Porém, o setor II (onde se localizam as árvores Pv11, Pv12, Pv13, Pv14 e Pv15) apresenta uma taxa muito elevada (107,7 mm/ano). Neste sector a voçoroca atingem a suas dimensões máximas e, portanto, cabe esperar as maiores taxas de erosão. Como esta metodologia é usada para quantificar a erosão laminar, deve-se tomar cuidado na interpretação dos mesmos já que é possível que esta forma de quantificação não seja totalmente confiável. O setor VI (onde está localizada a árvore

Tabela 12 – Taxa de erosão segundo o método de GÄRTNER (2007) relacionada com o aprofundamento da voçoroca

Setor da voçoroca	Amostra	Taxa (mm/ano)	Setor da voçoroca	Amostra	Taxa (mm/ano)
I	Pv5 EX r1 f2	51,5	II	Pv11 EX r1 f1	50,8
	Pv5 EX r1 f3	49,1		Pv11 EX r1 f10	150,8
	Pv5 EX r2 f2	50,0		Pv11 EX r2 f3	16,5
	Pv5 EX r2 f4	44,2		Pv11 EX r2 f5	19,4
	Pv6 EX r1 f1	3,7		Pv12 EX r1 f1	126,4
	Pv6 EX r1 f4	44,7		Pv12 EX r1 f4	116,4
	Pv6 EX r2 f2	-		Pv12 EX r1 f6	124,0
	Pv6 EX r2 f4	-		Pv12 EX r2 f1	136,9
	Pv6 EX r3 f1	25,4		Pv12 EX r2 f3	145,8
	Pv6 EX r3 f4	22,3		Pv13 EX r1 f1	38,2
	Pv8 EX r1 f1	-		Pv13 EX r1 f3	38,2
	Pv8 EX r1 f3	43,5		Pv13 EX r2 f1	58,3
	Pv8 EX r2 f2	10,0		Pv13 EX r2 f4	61,7
	Pv8 EX r2 f3	16,0		Pv14 EX r1 f6	133,6
	Pv9 EX r1 f3	16,3		Pv14 EX r2 f1	122,9
	Pv9 EX r1 f5	31,9		Pv14 EX r2 f3	172,0
	Pv9 EX r2 f2	15,0		Pv14 EX r2 f6	171,0
	Pv9 EX r2 f4	27,0		Pv14 EX r3 f1	112,5
	Média	30,0		Pv14 EX r3 f4	111,3
III	Pv2 EX r1 f1	28,0		Pv15 EX r1 f3	152,3
	Pv2 EX r1 f2	38,0		Pv15 EX r1 f5	150,0
	Pv2 EX r2 f2	27,5		Pv15 EX r2 f3	129,2
	Pv2 EX r2 f4	23,8		Pv15 EX r2 f5	138,5
	Pv2 EX r2 f6	22,5		Média	107,7
	Pv3 EX r1 f1	27,8	IV	Pv1 EX r1 f1	33,0
	Pv3 EX r1 f6	37,8		Pv1 EX r1 f4	25,0
	Pv4 EX r2 f1	20,0		Pv1 EX r2 f1	35,0
	Pv4 EX r2 f4	13,3		Pv1 EX r2 f3	52,7
	Média	26,5		Média	36,4
V	Pv7 EX r1 f1	24,2	VI	Pv10 EX r1 f3	94,2
	Pv7 EX r1 f4	22,5		Pv10 EX r1 f5	10,2
	Pv7 EX r2 f1	16,3		Pv10 EX r2 f2	72,9
	Pv7 EX r2 f2	16,3		Pv10 EX r2 f3	65,7
	Pv7 EX r3 f1	6,7		Média	84,2
	Pv7 EX r3 f5	16,3			
	Média	17,0			

Pv10) apresenta uma taxa de erosão de 84.2 mm/ano. Este resultado pode ser interpretado como consequência da recente formação da voçoroca, a qual ainda está em expansão com grande capacidade de retirada de sedimentos. Este fenômeno de maior erosão em zonas com menor tempo de exposição também é observado na literatura (BODOQUE et al., 2011b) onde a taxa de erosão diminui com o aumento do tempo de exposição. O setor com um valor médio menor da taxa de erosão é o V (onde se situa Pv7) com 17,0 mm/ano. Este setor se mostra como o mais indicado para usar este método para estimar a erosão, já que neste setor predominam os processos de erosão laminar. Os resultados da taxa de erosão em mm/ano unidos à média da densidade dos horizontes do solo (sendo 1,58 g/cm^3), calculou-se a perda de solo em t/ha·ano nos setores: setor I de 473 t/ha·ano, setor II de 1689 t/ha·ano, setor III de 418 t/ha·ano, setor IV de 574 t/ha·ano, setor V de 268 t/ha·ano e setor VI de 1294 t/ha·ano.

Os resultados obtidos nos setores I, III, IV e V (entre 17,0 e 36,5 mm/ano) mostram resultados semelhantes aos obtidos por BOVI (2013) de aproximadamente 29,3 mm/ano e 38,9 mm/ano, sendo este último referente ao mesmo talhão deste estudo. Estes valores também estão em consonância com os valores reportados por (BOLLATI et al., 2012), os quais foram adquiridos na área central dos Apeninos (Itália) em áreas afetadas por fortes enxurradas usando espécies de *Pinus pinea L*. As taxas encontradas foram entre 32,5 e 37,5 mm/ano que foram classificadas como catastróficas no mesmo estudo. Mesmo que a região estudada por BOLATI et al. (2012) não apresenta grandes valores de precipitação anual, são frequentes os episódios de chuva erosivas (35 mm/h), o que gera enxurradas com grande poder erosivo. No entanto, outros autores quantificaram a erosão do solo seguindo este procedimento em regiões com menores precipitações, como no caso de (WROŃSKA-WAŁACH, 2009), quem obteve taxas de erosão do solo entre 1,9 e 13,9 mm/ano nas montanhas de Gorce (Polônia), onde a precipitação média anual era de 750 mm. BODOQUE (2011), em um estudo localizado na bacia mediterrânea, com precipitações médias anuais de 680 mm, usando raízes de *Pinus pinaster* and *Pinus sylvestris*, obteve valores da taxa de erosão entre 6,2 e 8,8 mm/ano para raízes com exposições inferiores a 15 anos. Observa-se na literatura que existe grande disparidade entre os valores das taxas de erosão, isto se deve às diferenças climáticas regionais, tipos de solos, cobertura vegetal, etc. que influenciam diretamente sobre a erosão.

Portanto pode-se afirmar que a área de estudo apresenta valores da taxa de erosão elevados por dois motivos fundamentalmente: 1) por ser uma região de elevadas precipitações, quando comparado com outros estudos em climas temperados; e 2) por apresentar voçorocas recentes contendo raízes com curtos períodos de exposição. Junto com estes dois fatores, a abundante presença de *pipings* na área promove uma abertura maior da voçoroca.

A Tabela 13 apresenta os valores das taxas de erosão horizontal (TEH) de acordo com o procedimento estabelecido por MALIK (2008) e ŠILHÁN (2012), o qual é mais indicado para a quantificação da erosão em voçorocas.

Tabela 13 –Taxa de erosão horizontal segundo o método de MALIK (2008) e ŠILHÁN (2012)

Sector da voçoroca	Árvore	Raiz	Distância entre raízes vizinhas (m)	Ano de exposição		TEH (m/ano)
I	Pv6	R2		1999		
		R1	1,54	1995		0,39
	Pv5	R1	3,5	2003		0,44
		R2	0,08	2002		0,08
	Pv8	R1	8,19	1991		0,74
		R2	2,35	2004		0,18
	Pv9	R1	27	2008		6,75
		R2	1,58	2007		1,58
					Média	1,45
II	Pv11	R2	30,55	1997		
		R1	1,37	2001		0,34
	Pv15	R1	5,29	2001		1,67
		R2	1,42	2001		2,02
	Pv12	R2	1,6	2001		2,42
	Pv14	R3	5,65	1998		1,88
		R2	0,61	2000		0,31
					Média	1,44
III	Pv2	R1		2009		
		R2	0,87	2006		0,29
	Pv4	R2	4,82	2002		1,21
					Média	0,75

Esta metodologia, pelo fato de estar baseada no estudo de raízes dispostas transversal ou diagonalmente a longo da seção da voçoroca e no uso de raízes vizinhas,

provocou o descarte de alguns setores estudados anteriormente. Assim, no estudo da TEH foram utilizados somente os setores I, II e III (Figura 38). Desta forma, nestes setores o avanço longitudinal da voçoroca foi medido entre raízes distanciadas horizontalmente dentro dela e os respectivos anos de exposição.

Nos setores I e II, os valores médios da TEH são muito parecidos, 1,45 e 1,44 m/ano, respectivamente, enquanto que o valor médio para o setor III é de 0,75 m/ano. Portanto, os resultados da perda de solo em t/ha·ano por setores foi: setor I de 22.887 t/ha·ano, setor II de 22.729 t/ha·ano e setor III de 11838 t/ha·ano.

Novamente, o sector II apresenta elevadas taxas de perda de solo, porém a semelhança destes resultados com o sector I parece distar com os dados obtidos pelo método de GÄRTNER (2007), onde o sector I mostrou mais similaridade com o sector III (Tabela 12 e Figura 38). É importante salientar que as taxas de erosão estimadas por este método são maiores do que as obtidas pelo método do GÄRTNER (2007). Estas diferenças podem ser explicadas pela forma de cálculo destas taxas, onde GÄRTNER (2007) usa a altura vertical entre a raiz e a superfície do solo, estimando a velocidade de aprofundamento; e MALIK (2008) utiliza a distância horizontal entre as raízes vizinhas, estimando o avanço longitudinal da voçoroca ao longo da vertente.

Estes valores, independentemente do setor avaliado, são superiores em comparação aos valores obtidos por MALIK (2008) (0,63 m/ano), que usou raízes expostas de *Fagus sylvatica* dentro das voçorocas estudadas. Esta diferença pode ser atribuída à maior precipitação registrada na área deste estudo (1275 mm anuais) em comparação aos registros pluviométricos obtidos na região estudada por MALIK (680 mm/ano). Considerando os resultados da TEH obtidos por ŠILHÁN (2012), novamente, os resultados deste estudo são superiores (a exceção dos valores do sector III). Os valores médios da TEH reportados por ŠILHÁN, após descarte dos valores anômalos, foram de 0,89 m/ano. Porém, neste mesmo estudo, ŠILHÁN associa uma expansão extrema da voçoroca com o ano no qual aconteceu o maior episódio histórico de chuva registrado num intervalo de 24 horas na estação meteorológica mais próxima. Isto ratifica o que foi salientado anteriormente: os maiores valores de TEH obtidos neste estudo podem se explicar pela maior pluviosidade (própria de climas tropicais) da área de estudo, facilitando assim a abertura de voçorocas. Assim como a presença de solos e

condições favoráveis para a formação de *pipings* que facilitou e acelerou a ocorrência de voçorocas.

A Figura 39 mostra a relação entre a exposição das raízes com o número de eventos chuvosos erosivos no período entre os anos 1997-2013. Considera-se chuva erosiva em ambientes tropicais aquela superior a 25mm/hora (HUDSON, 1965). O valor médio de chuvas erosivas neste período foi de 30 chuvas por ano, sendo que a menor ocorrência deste tipo de chuvas aconteceu no ano 2005 com um número total de 18 chuvas e a maior ocorrência no ano 2002 com 48 chuvas erosivas (Figura 38). A grande maioria das chuvas erosivas nesta região tem uma intensidade entre 25 e 50 mm/hora.

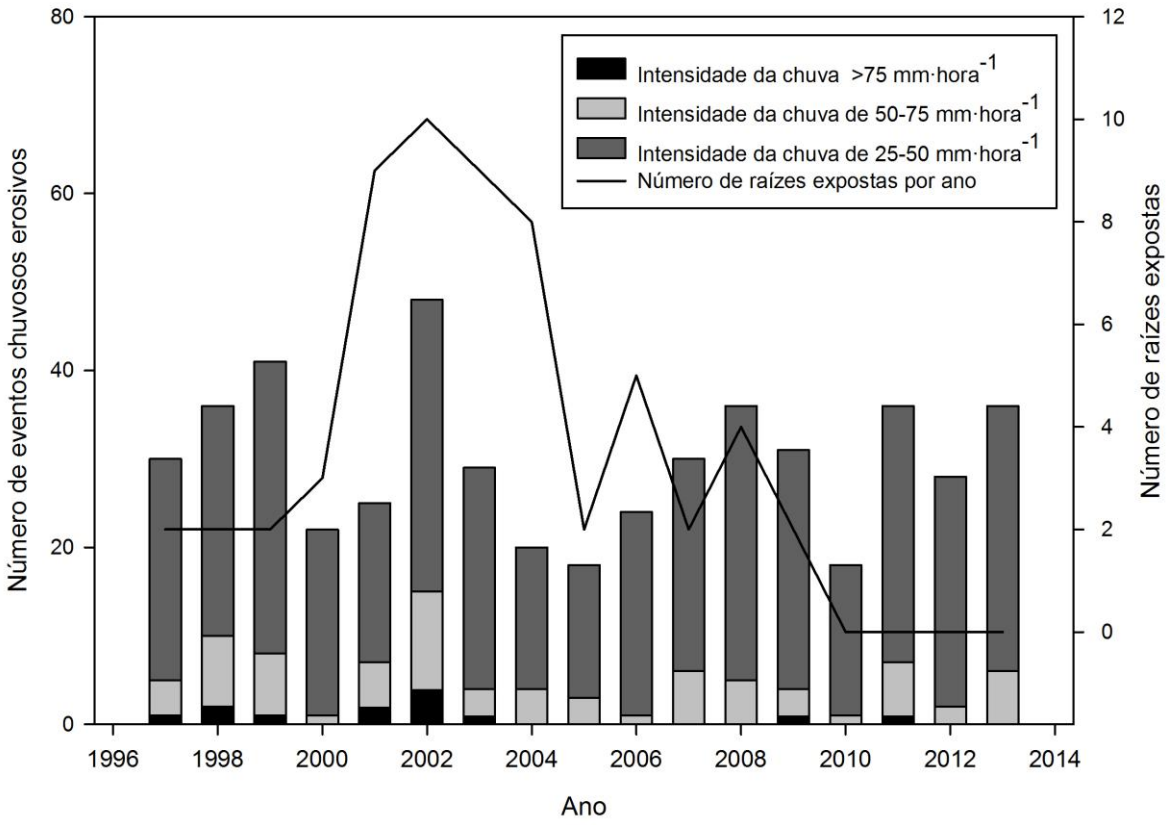


Figura 39 - Relação entre a exposição das raízes com o número de eventos chuvosos erosivos no período 1997-2013

Observou-se que no período 2001-2003 aconteceu o maior número de chuvas erosivas de alta intensidade (>75 mm/hora) o qual corresponde com um maior número de raízes expostas. Nove fatias das raízes indicaram a sua exposição no ano 2001, dez fatias foram expostas no ano 2002 e outras nove fatias foram expostas no ano 2003 (Figura 39). A maioria das raízes do setor II, caraterizado pela máxima dimensão da

voçoroca, foram expostas neste período (Figura 37 e 38). Assim, as intensas chuvas podem explicar as altas taxas de erosão desta parte da voçoroca. Além disso, cabe pensar que o sector II situado na parte inferior da voçoroca, recebe todo o fluxo da água proveniente da parte superior o que provoca o aumento do poder do processo erosivo de voçorocamento e maiores taxas de perda de solo. Grande parte da exposição das raízes do sector I (Figura 37 e 38) também aconteceu neste período (2001-2003) e no período anterior (1997-1999) onde se observou uma quantidade de chuvas erosivas acima da média e chuvas de intensidade acima de 75mm/hora (Figura 39). As raízes do sector I foram expostas de forma mais prolongada no tempo e durante os dois períodos de maior número de precipitações erosivas. Nos anos 2006 e 2008, o número de raízes expostas incrementou, porém, de forma menos significativa que nos períodos anteriores. Em 2006, não houve correlação entre o aumento do número das raízes expostas e o baixo número de chuvas, contudo, no ano 2008 a maior quantidade de raízes expostas correlacionou-se positivamente com um número de eventos chuvosos acima da média. Finalmente, na Figura 39 cabe destacar que o ano com menor quantidade de chuvas erosivas (2005) teve poucas raízes expostas (duas fatias da mesma raiz). Tal como indicaram os estudos realizados por MALIK (2008) e ŠILHÁN (2012), os anos com maior número de precipitações erosivas tiveram relação com o aumento da exposição das raízes.

A literatura (BODOQUE et al., 2005; CHARTIER; ROSTAGNO; ROIG, 2009; MALIK, 2008; PÉREZ-RODRÍGUEZ; MARQUES; BIENES, 2007; STOFFEL et al., 2013b; VANDEKERCKHOVE et al., 2001; ZHOU et al., 2013) mostra como os valores das taxas de erosão dependem do contexto do estudo. Por comparação, os resultados obtidos neste estudo manifestam a importância do estudo da erosão em áreas com grandes precipitações, pois nestes climas as taxas de erosão são superiores que as maiores obtidas em climas temperados.

A dendrogeomorfologia permitiu estudar a dinâmica do processo erosivo, a evolução da paisagem e estimar a taxa de erosão da voçoroca. Esta ferramenta considera-se econômica e relativamente rápida para a estimação das taxas de erosão e o entendimento da dinâmica desta, já que não precisa de monitoramento da área por longos períodos de tempo. Porém, este método está limitado a áreas com a presença de árvores que apresentem anéis de crescimento e requer um laboratório especializado com

pessoal qualificado. Esta abordagem é muito prática para, 1) o estudo da erosão, 2) gestão da terra sobre a erosão e conservação do solo e 3) para o estabelecimento de registros em regiões onde não existe ou é escassa esta informação ou o seu monitoramento (CHARTIER et al., 2016). Apesar dos escassos estudos dendrogeomorfológicos em áreas tropicais, este trabalho mostra o grande potencial da dendrogeomorfologia nestes ambientes.

5 CONCLUSÕES

I. As espécies dos gêneros *Pinus* usadas no trabalho apresentam dificuldades na identificação dos anéis de crescimento. A alta presença de anéis falsos, anéis ausentes ou pouca marcação dos anéis, em espécies de gênero Pinus em áreas tropicais, dificulta a identificação dos anéis de crescimento. Esta dificuldade manifesta-se de forma mais expressiva na datação dos anéis de crescimento das raízes expostas as quais apresentam crescimentos excêntricos e cicatrizes.

II. A erosão afeta a morfologia das raízes, já que a excentricidade da medula da raiz é significativamente maior nas raízes expostas quando comparadas com as raízes enterradas e testemunhas.

III. O crescimento do caule das árvores é influenciado pelos processos erosivos, dificultando a correlação entre os raios das diferentes árvores.

IV. O uso das variáveis largura do anel, índice de excentricidade e porcentagem do lenho tardio permitem obter resultados satisfatórios na determinação do primeiro ano da exposição das raízes.

V. A voçoroca é formada pela integração de dois sistemas de diferente origem, um desconectado e outro conectado à rede hidrográfica, que confluem em um degrau de erosão.

VI. A abertura e evolução da voçoroca é influenciada pela presença de *piping* na área. Este processo também afetam a morfologia das raízes quando enterradas.

VII. A taxa de erosão vertical, segundo o método de GÄRTNER (2007), atinge valores entre 17,0 e 36,5 mm/ano quantificando o processo de afundamento da voçoroca; e a taxa de erosão horizontal, segundo o método de MALIK (2008), valores de 0,70 e 1,45 m/ano caracterizando o avanço longitudinal da mesma.

VIII. O uso da dendrogeomorfologia permite entender e explicar a dinâmica do processo erosivo na voçoroca estudada. Assim, a dendrogeomorfologia reafirma-se como uma ferramenta com grande potencial para estudos geomorfológicos em áreas de ambientes tropicais.

Outras considerações finais

- O uso de fatias da mesma raiz e de raízes enterradas da mesma árvore facilita a identificação de anéis falsos e ausentes.
- As imagens de raio X servem como ferramenta complementar na identificação do primeiro ano da exposição da raiz, dos anéis de crescimento e diferenciação do lenho inicial e tardio dentro do anel.
- O estudo de voçorocas é complexo e muito variável tanto na escala temporal quanto espacial.
- Os anos com maior número de precipitações erosivas tem aumento do número de raízes expostas.

REFERÊNCIAS

AGASSI, M. (Ed.). **Soil erosion, conservation, and rehabilitation**. New York: Marcel Dekker, 1996. 442p.

AGUSTIN, C.; ARANHA, P. Piping em área de voçorocamento, noroeste de minas gerais. **Revista Brasileira de Geomorfologia**, São Paulo, v. 7, n. 1, p. 9–18, 2006.

AIELLO, A.; ADAMO, M.; CANORA, F. Remote Sensing and GIS to Assess Soil Erosion with RUSLE3D and USPED at River Basin Scale in Southern Italy. **Catena**, Amsterdam, v.131, p. 174–185, ago. 2015.

AL-DURRAH, M.M.; BRADFORD, J.M. The Mechanism of Raindrop Splash on Soil Surfaces1. **Soil Science Society of America Journal**, Madison, v. 46, n. 5, p. 1086, 1982.

ALESTALO, J. Dendrochronological interpretation of geomorphic processes. **Fenia**, Helsinki, v. 105, p. 1–139, 1971.

AMARAL, A.C. **Implantação da metodologia de densitometria de raios x em madeira.** 1994. Piracicaba: Escola Superior de Agricultura “Luiz de Queiroz”, Universidade de São Paulo, 1994. 102p.

AMARAL, A.C.; TOMAZELLO FILHO, M. Avaliação das caracteristicas dos aneis de crescimento de Pinus taeda atraves de microdensitometria de raios X. **Revista Ciência e Tecnologia**, Piracicaba, v. 11/12, n. 6, p. 17–23, 1998.

APPEZZATO-DA-GLORIA, B.; CARMELLO-GUERREIRO, S.M. **Anatomia vegetal**. Viçosa: UFV, 2006. 188p.

ARBO, M.M.; FERRUCI, M.S.; GONZALEZ, A.M.; CACERES MORAL, S. **Morfologia de plantas vasculares**, 2013. Disponível em: <http://www.biologia.edu.ar/botanica/tema16/16-1.htm>. Acesso em: 14 dez. 2015.

AZCÓN-BIETO, J.; TALÓN, M. **Fundamentos de fisiologia vegetal**. Barcelona; Edicions Universitat de Barcelona ; McGraw-Hill Interamericana, 2000. 522p.

BALLESTEROS-CÁNOVAS, J.A.; BODOQUE, J.M.; LUCÍA, A.; MARTÍN-DUQUE, J.F.; DÍEZ-HERRERO, A.; RUIZ-VILLANUEVA, V.; RUBIALES, J.M.; GENOVA, M. Dendrogeomorphology in badlands: Methods, case studies and prospects. **Catena**, Amsterdam, v. 106, n. 0, p. 113–122, jul. 2013a.

BALLESTEROS, J.A.; STOFFEL, M.; BODOQUE, J.M.; BOLLSCHWEILER, M.; HITZ, O.; DÍEZ-HERRERO, A. Changes in Wood Anatomy in Tree Rings of Pinus Pinaster Ait. Following Wounding by Flash Floods. **Tree-Ring Research**, Tucson, v. 66, n. 2, p. 93–103, jul. 2010.

BERTOL, I.; COGO, N. P.; SCHICK, J.; GUDAGNIN, J. C.; AMARAL, A. J. Aspectos Financeiros Relacionados às Perdas de Nutrientes Por Erosão Hídrica Em Diferentes Sistemas de Manejo Do Solo. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, Viçosa, v. 31, n. 1, p. 647-658 fev. 2007.

BERTONI, J.; LOMBARDI NETO, F. **Conservação do solo**. São Paulo: Ícone, 2005. 355p.

BISSONNAIS, Y. Aggregate Stability and Assessment of Soil Crustability and Erodibility: I. Theory and Methodology. **European Journal of Soil Science**, Cranfield, v. 47, n. 4, p. 425–437, dez. 1996.

BODOQUE, J.M.; DÍEZ-HERRERO, A.; MARTÍN-DUQUE, J.F.; RUBIALES, J.M.; GODFREY, A.; PEDRAZA, J.; CARRASCO, R.M.; SANZ, M.A. Sheet Erosion Rates Determined by Using Dendrogeomorphological Analysis of Exposed Tree Roots: Two Examples from Central Spain. **Catena**, Amsterdam, v. 64, n. 1, p. 81–102, nov. 2005.

BODOQUE, J.M.; LUCÍA, A.; BALLESTEROS, J.A.; MARTÍN-DUQUE, J.F.; RUBIALES, J.M.; GENOVA, M. Measuring Medium-Term Sheet Erosion in Gullies from Trees: A Case Study Using Dendrogeomorphological Analysis of Exposed Pine Roots in Central Iberia. **Geomorphology**, Amsterdam, v. 134, n. 3/4, p. 417–425, nov. 2011.

BOLLATI, I.; DELLA SETA, M.; PELFINI, M.; DEL MONTE, M.; FREDI, P.; LUPIA PALMIERI, E. Dendrochronological and Geomorphological Investigations to Assess Water Erosion and Mass Wasting Processes in the Apennines of Southern Tuscany (Italy). **Catena**, Amsterdam, v. 90, p. 1–17, mar. 2012.

BOLLSCHWEILER, M.; STOFFEL, M. Variations in debris-flow occurrence in an Alpine catchment — A reconstruction based on tree rings. **Global and Planetary Change**, Amsterdam, v. 73, n. 3/4, p. 186–192, sept. 2010.

BOLLSCHWEILER, M.; STOFFEL, M.; SCHNEUWLY, D. M.; BOURQUI, K. Traumatic Resin Ducts in Larix Decidua Stems Impacted by Debris Flows. **Tree Physiology**, Oxford, v. 28, n. 2, p. 255–263, 1 fev. 2008.

BOTOSSO, P.C. **Identificação macroscópica de madeiras.** Columbo: Embrapa Florestas, 2011. 25p.

BOTOSSO, P.C.; VETTER, R.; TOMAZELLO FILHO, M. 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: **Dendrocronologia en América Latina**. Mendoza, Argentina: EDIUNC, 2000. p. 357–379.

BOVI, R.C. **Avaliação espacial e temporal de processos erosivos e dendrogeomorfologia em um fragmento de mata atlântica em Piracicaba-SP**. 2013. 158p. Tese (Doutorado em Solos e Nutrição de Plantas) - Escola Superior de Agricultura "Luiz de Queiroz", Universidade de São Paulo Piracicaba, SP, Brasil, 2013.

BRAAM, R.R.; WEISS, E.E.J.; BURROUGH, P.A. Dendrogeomorphological Analysis of Mass Movement a Technical Note on the Research Method. **Catena,** Amsterdam, v. 14, n. 6, p. 585–589, dez. 1987.

BRYAN, R.B. Soil Erodibility and Processes of Water Erosion on Hillslope. **Geomorphology**, Amsterdam, v. 32, n. 3/4, p. 385–415, mar. 2000.

BULL, L.J.; KIRKBY, M.J. Gully Processes and Modelling. **Progress in Physical Geography**, Amsterdam, v. 21, n. 3, p. 354–374, 1 sept. 1997.

CAMARGO CORRÊA, C.; ROLOFF, G.; MALINOVSKI, J. Parameters of quality of the water originating from forest roads in Brazil. In: Soil and water conservation society; annual conference. 2005. Rochester/NY. **Proceedings…** Rochester/NY, 2005. 14p.

CANTÓN, Y.; SOLÉ-BENET, A.; ASENSIO, C.; CHAMIZO, S.; PUIGDEFÁBREGAS, J. Aggregate Stability in Range Sandy Loam Soils Relationships with Runoff and Erosion. **Catena,** Amsterdam, v. 77, n. 3, p. 192–199, jun. 2009.

CARRARA, P.; CARROLL, T.The determination of erosion rates from exposed tree roots in the Piceance Basin, Colorado. **Earth Surface Processes and Landforms**, Chichester, v. 4, p. 307–317, 1979.

CASSAB, G.I.; SÁNCHEZ-GUEVARA, Y. **Mecanismos de desarrollo y fisiología de raíces de plantas superiores.** Biotecnología. Universidad Autónoma de México., 2007. . Disponível em: <http://www.ibt.unam.mx/computo/pdfs/libro_25_aniv/capitulo_19.pdf>. Acesso em: 10 maio. 2015.

CASTELLER, A.; STOFFEL, M.; CRESPO, S.; VILLALBA, R.; CORONA, C.; BIANCHI, E. Dendrogeomorphic reconstruction of flash floods in the Patagonian Andes. **Geomorphology**, Amsterdam, v. 228, n. 0, p. 116–123, 1 jan. 2015.

CEPAGRI. **Centro de Pesquisas Meteorológicas e Climáticas Aplicadas à Agricultura**, 2015. Disponível em: <http://www.cepagri.unicamp.br/>.

CHANG, M.; AGUILAR, G.J.R. Effects of Climate and Soil on the Radial Growth of Loblolly Pine (Pinus Taeda L.) in a Humid Environment of Southeastern U.S.A. **Forest Ecology and Management**, Amsterdam, v. 3, p. 141–150, jan. 1980.

CHARTIER, M.P.; GIANTOMASI, M.A.; RENISON, D.; ROIG, F.A. Exposed Roots as Indicators of Geomorphic Processes: A Case-Study from Polylepis Mountain Woodlands of Central Argentina. **Dendrochronologia**, Jena, v. 37, p. 57–63, mar. 2016.

CHARTIER, M.P.; ROSTAGNO, C.M.; ROIG, F.A. Soil Erosion Rates in Rangelands of Northeastern Patagonia: A Dendrogeomorphological Analysis Using Exposed Shrub Roots. **Geomorphology**, Amsterdam, v. 106, n. 3/4, p. 344–351, maio 2009.

CLARK, A.; DANIELS, R.F.; JORDAN, L. Juvenile/mature wood transition in loblolly pine as defined by annual ring specific gravity, proportion of latewood, and microfibril angle. **Wood and Fiber Science**, Madison, v. 38, n. 2, p. 292–299, 2006.

COOK, E.R.; KAIRIŪKŠTIS, L. **Methods of dendrochronology**: applications in the environmental sciences [s.l]. International Institute for Applied Systems Analysis, 1990. 394p.

COROMINAS, J.; MOYA, J. Contribution of Dendrochronology to the Determination of Magnitude–frequency Relationships for Landslides. **Geomorphology**, Amsterdam, v. 124, n. 3-4, p. 137–149, dez. 2010.

CORONA, C.; LOPEZ SAEZ, J.; ROVÉRA, G.; STOFFEL, M.; ASTRADE, L.; BERGER, F. High Resolution, Quantitative Reconstruction of Erosion Rates Based on Anatomical Changes in Exposed Roots at Draix, Alpes de Haute-Provence — Critical Review of Existing Approaches and Independent Quality Control of Results. **Geomorphology**, Amsterdam, v. 125, n. 3, p. 433–444, fev. 2011.

COSTA, A. **Anatomia da madeira.**Coletâneas de Anatomia da Madeira, 2001. Disponível em: <http://www.ebah.com.br/content/ABAAAfLSsAB/apostilanatomia1?part=3>.

CROSSON, P. Chapter 57 Soil Quality and Agricultural Development. In: **Handbook of Agricultural Economics**. Amsterdam:Elsevier, 2007. p.2911–2932.

COUTTS, M. Factors affecting the direction of growth of tree roots. **Annales des Sciences Forestières**, Champenoux, v. 46, p. 277–287, 1989.

DARBOUX, F.; DAVY, P.; GASCUEL-ODOUX, C.; HUANG, C. Evolution of Soil Surface Roughness and Flowpath Connectivity in Overland Flow Experiments. **Catena**, Amsterdam, v. 46, n. 2/3, p. 125–139, jan. 2002.

DE ABREU, R.C.R.; DURIGAN, G. Changes in the Plant Community of a Brazilian Grassland Savannah after 22 Years of Invasion by *Pinus Elliottii* Engelm. **Plant Ecology & Diversity**, Edinburgh, v. 4, n. 2/3, p. 269–278, jun. 2011.

DELLA SETA, M.; DEL MONTE, M.; FREDI, P.; LUPIA PALMIERI, E. Space–time Variability of Denudation Rates at the Catchment and Hillslope Scales on the Tyrrhenian Side of Central Italy. **Geomorphology**, Amsterdam, v. 107, n. 3/4, p. 161–177, jun. 2009.

DE MICCO, V.; BATTIPAGLIA, G.; CHERUBINI, P.; ARONNE, G. Comparing Methods to Analyse Anatomical Features of Tree Rings with and without Intra-Annual Density Fluctuations (IADFs). **Dendrochronologia**, Jena v. 32, n. 1, p. 1–6, 2014.

EMBRAPA. **Empresa Brasileira de Pesquisa Agropecuária**, 2015. Disponível em: <http://www.agencia.cnptia.embrapa.br/>.

FANTUCCI, R. Dendrogeomorphological Analysis of Shore Erosion along Bolsena Lake (Central Italy). **Dendrochronologia**, Amsterdam, v. 24, n. 2/3, p. 69–78, fev. 2007.

FAULKNER, H. Piping Hazard on Collapsible and Dispersive Soils in Europe. In: BOARDMAN, J.; POESEN, J. (Ed.). **Soil Erosion in Europe**. Chichester, UK: John Wiley, 2006. p. 537–562.

FAULKNER, H. Badlands in Marl Lithologies: A Field Guide to Soil Dispersion, Subsurface Erosion and Piping-Origin Gullies. **Catena,** Amsterdam, v. 106, p. 42–53, jul. 2013.

FAULKNER, H.; SPIVEY, D.; ALEXANDER, R. The Role of Some Site Geochemical Processes in the Development and Stabilisation of Three Badland Sites in Almeria, Southern Spain. **Geomorphology**, Amsterdam, v. 35, n. 1/2, p. 87–99, out. 2000.

FAVILLIER, A.; LOPEZ-SAEZ, J.; CORONA, C.; TRAPPMANN, D.; TOE, D.; STOFFEL, M.; ROVÉRA, G.; BERGER, F. Potential of Two Submontane Broadleaved Species (Acer Opalus, Quercus Pubescens) to Reveal Spatiotemporal Patterns of Rockfall Activity. **Geomorphology**, Amsterdam, v. 246, p. 35–47, out. 2015.

FAYLE, D.C. **Radial growth in tree roots:** distribution, timing, anatomy**.** 1968. University of Toronto. Faculty of Forestry, 1968. 183p.

FAYLE, D.C. Stem Sway affects width and compression wood formation in exposed root bases. **Forest Science**, Bethesda, v. 22, p. 193–194, 1976.

FLORENZANO, T.G. (Ed.). **Geomorfologia**: conceitos e tecnologias atuais. São Paulo: Oficina de Textos, 2008. 318p.

FORD, C.R.; BROOKS, J.R. Detecting Forest Stress and Decline in Response to Increasing River Flow in Southwest Florida, USA. **Forest Ecology and Management**, Amsterdam, v. 160, n. 1/3, p. 45–64, maio 2002.

FORD, C.R.; BROOKS, J.R. Hydrological and climatic responses of *Pinus elliottii* var. *densa* in mesic pine flatwoods Florida, USA. **Annals of Forest Science**, Champenoux , v. 60, n. 5, p. 385–392, jul. 2003.

FOSTER, T.E.; BROOKS, J.R. Long-Term Trends in Growth of *Pinus Palustris* and *Pinus Elliottii* along a Hydrological Gradient in Central Florida. **Canadian Journal of Forest Research**, Ottawa, v. 31, n. 10, p. 1661–1670, out. 2001.

FOX, D.M.; LE BISSONNAIS, Y.; QUÉTIN, P. The Implications of Spatial Variability in Surface Seal Hydraulic Resistance for Infiltration in a Mound and Depression Microtopography. **Catena**, Amsterdam, v. 32, n. 2, p. 101–114, maio 1998.

FRANCESCHINI, T.; LONGUETAUD, F.; BONTEMPS, J.-D.; BOURIAUD, O.; CARITEY, B.-D.; LEBAN, J.-M. Effect of Ring Width, Cambial Age, and Climatic Variables on the within-Ring Wood Density Profile of Norway Spruce Picea Abies (L.) Karst. **Trees -Structure And Function**, New York, v. 27, n. 4, p. 913–925, ago. 2013.

FRIEND, A.L.; HAFLEY, W.L. Climatic Limitations to Growth in Loblolly and Shortleaf Pine (Pinus Taeda and P. Echinata): A Dendroclimatological Approach. **Forest Ecology and Management**, Amsterdam, v. 26, n. 2, p. 113–122, jan. 1989.

FRITTS, H.C. **Tree rings and climate**. Caldwell, N.J: Blackburn Press, 2001. 567p.

GARCÍA ESTEBAN, L. (Ed.). **La madera y su anatomía**: anomalías y defectos, estructura microscópica de coníferas y frondosas, identificación de maderas, descripción de especies y pared celular. Madrid: Fundación Conde del Valle de Salazar : Ediciones Mundi-Prensa : AiTiM, 2003. 327p.

GÄRTNER, H. Tree roots — Methodological review and new development in dating and quantifying erosive processes. **Geomorphology**, Amsterdam, v. 86, n. 34, p. 243–251, 1 maio 2007.

GÄRTNER, H.; HEINRICH, I. GLACIAL LANDFORMS, TREE RINGS | Dendrogeomorphology. In: **Encyclopedia of Quaternary Science**. Amsterdam, Elsevier, 2013. p. 91–103.

GÄRTNER, H.; SCHWEINGRUBER, F. H.; DIKAU, R. Determination of erosion rates by analyzing structural changes in the growth pattern of exposed roots. **Dendrochronologia**, Jena, v.19, p. 81–91, 2001.

GÉNOVA, M.; MÁYER, P.; BALLESTEROS-CÁNOVAS, J.; RUBIALES, J. M.; SAZ, M. A.; DÍEZ-HERRERO, A. Multidisciplinary Study of Flash Floods in the Caldera de Taburiente National Park (Canary Islands, Spain). **Catena**, Amsterdam, v. 131, p. 22–34, ago. 2015.

GONZALEZ-BENECKE, C.A.; MARTIN, T.A.; CLARK, A.; PETER, G.F. Water Availability and Genetic Effects on Wood Properties of Loblolly Pine (*Pinus Taeda*). **Canadian Journal of Forest Research**, Ottawa, v. 40, n. 12, p. 2265–2277, dez. 2010.

GRAHAM, J.H.; DUDA, J.J.; BROWN, M.L.; KITCHEN, S.; EMLEN, J.M.; MALOL, J.; BANKSTAHL, E.; KRZYSIK, A.J.; BALBACH, H.; FREEMAN, D.C. The Effects of Drought and Disturbance on the Growth and Developmental Instability of Loblolly Pine (Pinus Taeda L.). **Ecological Indicators**, Amsterdam, v. 20, p. 143–150, sept. 2012.

GRIEBELER, N.P.; PRUSKI, F.F.; SILVA, J.M.A. da; RAMOS, M.M.; SILVA, D. D. da. Modelo Para a Determinação Do Espaçamento Entre Desaguadouros Em Estradas Não Pavimentadas. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, Viçosa, v. 29, n. 3, p. 397-405, jun. 2005.

GRISSINO-MAYER, H. Evaluating crossdating accuracy: A manual and tutorial for the computer program COFECHA. **Tree-Ring Research**, Tucson, v. 57, n. 2, p. 205–211, 2001.

GUARDIOLA-ALBERT, C.; BALLESTEROS-CÁNOVAS, J. A.; STOFFEL, M.; DIEZ-HERRERO, A. How to improve dendrogeomorphic sampling: variogram analyses of wood density using x-ray computed tomography. **Tree-ring research**, Tucson, v. 71, n. 1, p. 25–36, 2015.

GUERRA, A.J.T.; SILVA, A.S. da; BOTELHO, R.G.M. (Ed.). **Erosão e conservação dos solos:** conceitos, temas e aplicações. Rio de Janeiro: Bertrand Brasil, 1999. 339p.

HARLEY, G.L.; GRISSINO-MAYER, H.D.; HORN, S.P. The Dendrochronology of Pinus Elliottii in the Lower Florida Keys: Chronology Development and Climate Response. **Tree-Ring Research**, Tucson, v. 67, n. 1, p. 39–50, jan. 2011.

HELMING, K.; RÖMKENS, M.J.M.; PRASAD, S.N. Surface Roughness Related Processes of Runoff and Soil Loss: A Flume Study. **Soil Science Society of America Journal**, Madison, v. 62, n. 1, p. 243, 1998.

HITZ, O.M.; GÄRTNER, H.; HEINRICH, I.; MONBARON, M. Application of Ash (Fraxinus Excelsior L.) Roots to Determine Erosion Rates in Mountain Torrents. **Catena,** Amsterdam, v. 72, n. 2, p. 248–258, jan. 2008a.

HITZ, O.M.; GÄRTNER, H.; HEINRICH, I.; MONBARON, M. Wood Anatomical Changes in Roots of European Ash (Fraxinus Excelsior L.) after Exposure. **Dendrochronologia**, Jena, v. 25, n. 3, p. 145–152, mar. 2008b.

HOLMES, R.; ADAMS, R.; FRITTS, H.C. Quality control of crossdating and measuring: a user's manual for program COFECHA. **Tree-ring chronologies of wester north america;** California, easter oregon and northern great basin. Tucson , 1986. p. 15–35.

HOWELL, B.E.; MATHIASEN, R.L. Growth Impacts of Psittacanthus Angustifolius Kuijt on Pinus Oocarpa Schiede in Honduras. **Forest Ecology and Management**, Amsterdam, v. 198, n. 1/3, p. 75–88, ago. 2004.

HUBER, S.; PROKOP, G.; ARROUAYS, D.; BANKO, G.; BISPO, A.; JONES, R. J.; KIBBLEWHITE, M.; LEXER, W; MÖLLER, A.; RICKSON, R.; SHISHKOV, T.; STEPHENS, M.; TOTH, G.; VAN DEN AKKER, J.J. .; VARALLYAY, G.; VERHEIJEN, F. G.; JONES, A. **ENVASSO Project, Environmental Assessment of Soil for Monitoring**. Luxembourg: Office for Official Publications of the European Communities, 2008. 358p.

HUDSON, N.W. **The influence of rainfall on the mechanics of soil erosion with particular reference to Southern Rhodesia**. Cape Town: University of Cape Town, 1965. 316 p.

HUMBERTO, B.-C. **Principles of soil conservation and management**. 8th ed. New York, NY: Springer Berlin Heidelberg, 2008. 256p.

ITRD- INTERNATIONAL TREE-RING DATA. **Dendrochronological series of Pinus taeda.**, 2015. . Disponível em: <https://www.ncdc.noaa.gov/paleo/study/2682; https://www.ncdc.noaa.gov/paleo/study/2685; https://www.ncdc.noaa.gov/paleo/study/2686; https://www.ncdc.noaa.gov/paleo/study/4202; http://www.ncdc.noaa.gov/paleo/study/18204>.

JOHNSON, W.C. Dendrochronological Sampling of Pinus oocarpa Shiede Near Copan, Honduras: A Preliminary Note. **Biotropica**, Malden, v. 12, n. 4, p. 315, dez. 1980.

JOKELA, E.J.; DOUGHERTY, P.M.; MARTIN, T.A. Production Dynamics of Intensively Managed Loblolly Pine Stands in the Southern United States: A Synthesis of Seven Long-Term Experiments. **Forest Ecology and Management**, Amsterdam, v. 192, n. 1, p. 117–130, abr. 2004.

JONES, J.A.A. Implications of Natural Soil Piping for Basin Management in Upland Britain. **Land Degradation & Development**, Chichester, v. 15, n. 3, p. 325–349, maio 2004.

KACZKA, R.J.; DESLAURIERS, A.; MORIN, H. High-Precision Dating of Debris-Flow Events Within the Growing Season. In: STOFFEL, M.; BOLLSCHWEILER, M.; BUTLER, D.R.; LUCKMAN, B.H. (Ed.). **Tree Rings and Natural Hazards**. Dordrecht: Springer Netherlands, 201. , v.41. p. 227–229.

KIRKBY, M.J.; MORGAN, R.P.C. (Ed.). **Soil erosion**. Chichester; New York: Wiley, 1980. 312p.

KOPROWSKI, M.; WINCHESTER, V.; ZIELSKI, A. Tree Reactions and Dune Movements: Slowinski National Park, Poland. **Catena**, Amsterdam, v. 81, n. 1, p. 55–65, abr. 2010.

LAL, R. (Ed.). **Methods for assessment of soil degradation**. Boca Raton, Fla: CRC Press, 1998. 558p

LAL, R. Soil Degradation by Erosion. **Land Degradation & Development**, Chichester, n. 6, p. 519–539, nov. 2001.

LAL, R. Soil Carbon Sequestration to Mitigate Climate Change. **Geoderma**, Amsterdam, v. 123, n. 1/2, p. 1–22, nov. 2004.

LAL, R. Laws of Sustainable Soil Management. **Agronomy for Sustainable Development**, Les Ulis, v. 29, n. 1, p. 7–9, mar. 2009.

LA MARCHE, V. Rate of slope erosion in theWhiteMountains, California. **Geological Society of America Bulletin**, Boulder, v. 72, p. 1579–1580, 1961.

LEPSCH, I. F. **19 lições de pedologia**. São Paulo: Oficina de Textos, 2011. 459p.

LISI, C.S.; VOIGT, A.R.A.; MARIA, V.R.B.; TOMAZELLO, .F.O. M.; FERREIRA-FEDELE, L.; BOTOSSO, P.C.; ROIG, F.A. Tree-Ring Formation, Radial Increment Periodicity, and Phenology of Tree Species from a Seasonal Semi-Deciduous Forest in Southeast Brazil. **IAWA Journal**, Leiden, v. 29, n. 2, p. 189–207, 1 jan. 2008.

MAIA, N.B.; MARTOS, H.L.; BARRELLA, W.; BOLLMANN, H.A.; PONTIFÍCIA UNIVERSIDADE CATÓLICA DE SÃO PAULO (Ed.). **Indicadores ambientais:** conceitos e aplicações. São Paulo: Educ ; COMPED, INEP, 2001. 20p.

MÄKINEN, H. Effect of Thinning and Natural Variation in Bole Roundness in Scots Pine (Pinus Sylvestris L.). **Forest Ecology and Management**, Amsterdam, v. 107, n. 1-3, p. 231–239, ago. 1998.

MALIK, I. Dating of Small Gully Formation and Establishing Erosion Rates in Old Gullies under Forest by Means of Anatomical Changes in Exposed Tree Roots (Southern Poland). **Geomorphology**, Amsterdam, v. 93, n. 3/4, p. 421–436, jan. 2008.

MALIK, I.; WISTUBA, M. Dendrochronological methods for reconstructing mass movements — An example of landslide activity analysis using tree-ring eccentricity. **Geochronometria**, Warsaw, v. 39, n. 3, p.180-196, jan. 2012.

MARTÍNEZ-CASASNOVAS, J., A Spatial Information Technology Approach for the Mapping and Quantification of Gully Erosion. **Catena**, Amsterdam, v. 50, n. 2/4, p. 293–308, jan. 2003.

MATTOS, J.R. **Espécies de pinus cultivadas no brasil**. São Paulo, SP, Brasil: Grupo Editorial Chácaras e Quintais, s/d. 133p.

MERTEN, G.H.; NEARING, M.A.; BORGES, A.L.O. Effect of Sediment Load on Soil Detachment and Deposition in Rills. **Soil Science Society of America Journal**, Madison, v. 65, n. 3, p. 861, 2001.

MIZUGAKI, S.; NAKAMURA, F.; ARAYA, T. Using Dendrogeomorphology and 137Cs and 210Pb Radiochronology to Estimate Recent Changes in Sedimentation Rates in Kushiro Mire, Northern Japan, Resulting from Land Use Change and River Channelization. **Catena**, Amsterdam, v. 68, n. 1, p. 25–40, dez. 2006.

MOMOLI, R. S.; COOPER, M.; TOMAZELLO FILHO, M.; SILVEIRA LOBÃO, M. Aplicação da dendrogeomorfologia no estudo da deposição de sedimentos do solo no tronco de árvores de Guarea guidonea em mata ciliar antropizada no estado de Goias, Brasil. **Scientia Forestalis**, Piracicaba, v. 40, n. 93, p. 7–14, 2012.

MORGAN, R.P.C. **Soil erosion & conservation**. 2nd ed. Oxford: Blackwell, 2005. 316p.

NADAL-ROMERO, E.; LATRON, J.; MARTÍ-BONO, C.; REGÜÉS, D. Temporal Distribution of Suspended Sediment Transport in a Humid Mediterranean Badland Area: The Araguás Catchment, Central Pyrenees. **Geomorphology**, Amsterdam, v. 97, n. 3/4, p. 601–616, maio 2008.

NEARING, M.A.; BRADFORD, J.M.; HOLTZ, R.D. Measurement of Waterdrop Impact Pressures on Soil Surfaces1. **Soil Science Society of America Journal**, Madison, v. 51, n. 5, p. 1302, 1987.

NEARING, M.A.; PARKER, S.C. Detachment of Soil by Flowing Water Under Turbulent and Laminar Conditions. **Soil Science Society of America Journal**, Madison, v. 58, n. 6, p. 1612, 1994.

NYSSEN, J.; POESEN, J.; VEYRET-PICOT, M.; MOEYERSONS, J.; HAILE, M.; DECKERS, J.; DEWIT, J.; NAUDTS, J.; TEKA, K.; GOVERS, G. Assessment of Gully Erosion Rates through Interviews and Measurements: A Case Study from Northern Ethiopia. **Earth Surface Processes and Landforms**, Chichester, v. 31, n. 2, p. 167–185, fev. 2006.

PARKER, C. Piping, a geomorphic agent in landform development of the drylands. **International Association of Scientific Hydrology Publication**, Wallingford, v. 65, p. 103–113, 1964.

PARKER, K.C.; JENSEN, C.; PARKER, A.J. The Growth Response of Slash Pine (Pinus Elliottii) to Climate in the Georgia Coastal Plain. **Dendrochronologia**, Jena, v. 32, n. 2, p. 127–136, 2014.

PÉREZ-RODRÍGUEZ, R.; MARQUES, M.J.; BIENES, R. Use of Dendrochronological Method in Pinus Halepensis to Estimate the Soil Erosion in the South East of Madrid (Spain). **Science of The Total Environment**, Amsterdam, v. 378, n. 1/2, p. 156–160, maio 2007.

PIERI, L.; BITTELLI, M.; HANUSKOVA, M.; VENTURA, F.; VICARI, A.; PISA, P. R. Characteristics of Eroded Sediments from Soil under Wheat and Maize in the North Italian Apennines. **Geoderma**, Amsterdam, v. 154, n. 1/2, p. 20–29, dez. 2009.

PIMENTEL, D. Soil Erosion: A Food and Environmental Threat. **Environment, Development and Sustainability**, New York, v. 8, n. 1, p. 119–137, fev. 2006.

PIMENTEL, D.; HARVEY, C.; RESOSUDARMO, P.; SINCLAIR, K.; KURZ, D.; MCNAIR, M.; CRIST, S.; SHPRITZ, L.; FITTON, L.; SAFFOURI, R.; BOVI, R. Environmental and Economic Costs of Soil: Erosion and Conservation Benefits. **Science**, v.267, p. 1117–1123, 1995.

PINHEIRO, G.S.; GIANNOTTI, E.; CRESTANA, C.S.M.; PFEIFER, R.M.; SILVA, D.A.; NEGREIROS, O.C.; BARBOSA, A.F.; MARIANO, G.; GUTMANIS, D.; ROMANELLI, R.C.; SILVA, A.A. da; BERGAMASSO, A. **Plano de manejo da Estação Experimental de Tupi Piracicaba, SP**. São Paulo: Instituto Florestal, 1999. 61p. (Série Registros, 19).

POESEN, J.; NACHTERGAELE, J.; VERSTRAETEN, G.; VALENTIN, C. Gully Erosion and Environmental Change: Importance and Research Needs. **Catena**, Amsterdam, v. 50, n. 2/4, p. 91–133, jan. 2003.

POLACEK, D.; KOFLER, W.; OBERHUBER, W. Radial Growth of Pinus Sylvestris Growing on Alluvial Terraces Is Sensitive to Water-Level Fluctuations. **New Phytologist**, Malden, v. 169, n. 2, p. 299–308, fev. 2006.

POSTO AGRO METEOROLÓGICO DA ESALQ-USP. **Dados meteologicos**, 2015. . Disponível em: <http://www.leb.esalq.usp.br/posto/>.

ROMERO DÍAZ, A.; MARIN SANLEANDRO, A.; SANCHEZ SORIANO, A. Procesos de piping en el paraje de Los Brianes-Corvera. In: J. HERNÁNDEZ BASTIDA (Ed.) **Recorridos por el Campo de Cartagena**. Murcia: Instituto Mediterráneo del Agua., 2011. p. 57–71.

ROMERO DÍAZ, A.; MARÍN SANLEANDRO, P.; SÁNCHEZ SORIANO, A.; BELMONTE SERRATO, F.; FAULKNER, H. The Causes of Piping in a Set of Abandoned Agricultural Terraces in Southeast Spain. **Catena**, Amsterdam, v. 69, n. 3, p. 282–293, abr. 2007.

ROUSSEVA, S.; TORRI, D.; PAGLIAI, M. Effect of Rain on the Macroporosity at the Soil Surface. **European Journal of Soil Science**, Chichester, v. 53, n. 1, p. 83–93, mar. 2002.

ROZAS, V. Tree age estimates in Fagus sylvatica and Quercus robur. Testing previous and improved methods. **Plant Ecology**, Dordrecht, v. 167, p. 193–2012, 2003.

RUIZ-VILLANUEVA, V. The Palaeoflood Record of Pelayo and Arenal Rivers (Central Spain) Reconstructed by Dendrogeomorphology. **Quaternary International**, Oxford, v. 417, p. 279-280, 2012.

RUIZ-VILLANUEVA, V.; DÍEZ-HERRERO, A.; STOFFEL, M.; BOLLSCHWEILER, M.; BODOQUE, J. M.; BALLESTEROS, J. A. Dendrogeomorphic analysis of flash floods in a small ungauged mountain catchment (Central Spain). **Geomorphology**, Amsterdam, v. 118, n. 3/4, p. 383–392, 1 jun. 2010.

SAMUELSON, L.J.; EBERHARDT, T.L.; BARTKOWIAK, S.M.; JOHNSEN, K.H. Relationships between Climate, Radial Growth and Wood Properties of Mature Loblolly Pine in Hawaii and a Northern and Southern Site in the Southeastern United States. **Forest Ecology and Management**, Amsterdam, v. 310, p. 786–795, dez. 2013.

SAMUELSON, L.J.; EBERHARDT, T.L.; BUTNOR, J.R.; STOKES, T.A.; JOHNSEN, K.H. Maximum Growth Potential in Loblolly Pine: Results from a 47-Year-Old Spacing Study in Hawaii. **Canadian Journal of Forest Research**, Ottawa, v. 40, n. 10, p. 1914–1929, out. 2010.

SCHINKER, M.G.; HANSEN, N.; SPIECKER, H. High-Frequency Densitometry-A New Method for the Rapid Evaluation of Wood Density Variations. **IAWA Journal**, Leiden, v. 24, n. 3, p. 231–239, 1 jan. 2003.

SCHNEUWLY, D.M.; STOFFEL, M. Spatial Analysis of Rockfall Activity, Bounce Heights and Geomorphic Changes over the Last 50 Years – A Case Study Using Dendrogeomorphology. **Geomorphology**, Amsterdam, v. 102, n. 3/4, p. 522–531, dez. 2008.

SCHNEUWLY, D.M.; STOFFEL, M.; DORREN, L.K.A.; BERGER, F. Three-Dimensional Analysis of the Anatomical Growth Response of European Conifers to Mechanical Disturbance. **Tree Physiology**, Oxford, v. 29, n. 10, p. 1247–1257, 1 out. 2009.

SCHULTZ, R.P. Loblolly — the pine for the twenty-first century. In: BOYLE, J. R.; WINJUM, J.K.; KAVANAGH, K.; JENSEN, E.C. (Ed.). **Planted Forests:** Contributions to the Quest for Sustainable Societies. Dordrecht: Springer Netherlands, 1999. 56p. 71–88.

SCHWEINGRUBER, F.H. **Tree rings**: basics and applications of dendrochronology. Dordrecht ; Boston : Norwell, MA, U.S.A: D. Reidel . ; Sold and distributed in the U.S.A. and Canada by Kluwer Academic Publishers, 1988. 279p.

SCHWEINGRUBER, F.H. **Trees and wood in dendrochronology:** morphological, anatomical, and tree-ring analytical characteristics of trees frequently used in dendrochronology. Berlin ; New York: Springer-Verlag, 1993. 402p.

SCHWEINGRUBER, F.H. **Tree rings and environment dendroecology**. Berne ;Stuttgart ;Vienna: Haupt, 1996. 609p.

SCHWEINGRUBER, F.H. **Wood structure and environment**. Berlin ; New York: Springer, 2007. 279p.

SCHWEINGRUBER, F.H.; BÖRNER, A.; SCHULZE, E.-D. **Atlas of woody plant stems: evolution, structure, and environmental modifications**. Berlin: Springer, 2006. 229p.

ŠILHÁN, K. Dendrogeomorphological analysis of the evolution of slope processes on flysch rocks (vsetínské vrchy mts; czech republic). **Carpathian Journal of Earth and Environmental Sciences**, Baia Mare, v. 7, n. 3, p. 39–49, 2012.

ŠILHÁN, K.; STOFFEL, M. Impacts of Age-Dependent Tree Sensitivity and Dating Approaches on Dendrogeomorphic Time Series of Landslides. **Geomorphology**, Amsterdam, v. 236, p. 34–43, maio 2015.

SIVAKUMAR, M.V K. Interactions between Climate and Desertification. **Agricultural and Forest Meteorology**, Amsterdam, v. 142, n. 2/4, p. 143–155, fev. 2007.

SPEER, J.H. **Fundamentals of tree-ring research**. Tucson, Ariz: Univ. of Arizona Press, 2010. 368p.

STOFFEL, M. (Ed.). **Tree rings and natural hazards:** a state-of-the-art. Dordrecht [Netherlands] ; New York: Springer, 2010. 505p.

STOFFEL, M.; CORONA, C. Dendroecological Dating of Geomorphic Disturbance in Trees. **Tree-Ring Research**, Tucson, v. 70, n. 1, p. 3–20, jan. 2014.

STOFFEL, M.; CORONA, C.; BALLESTEROS-CÁNOVAS, J.A.; BODOQUE, J.M. Dating and quantification of erosion processes based on exposed roots. **Earth-Science Reviews**, Amsterdam, v. 123, n. 0, p. 18–34, ago. 2013a.

STOFFEL, M.; KLINKMÜLLER, M. 3D Analysis of Anatomical Reactions in Conifers after Mechanical Wounding: First Qualitative Insights from X-Ray Computed Tomography. **Trees -Structure And Function**, New York, v. 27, n. 6, p. 1805–1811, dez. 2013.

STOFFEL, M.; LUCKMAN, B.H.; BUTLER, D.R.; BOLLSCHWEILER, M. 12.9 Dendrogeomorphology: Dating Earth-Surface Processes with Tree Rings. In: SHRODER, J. F. (Ed.). **Treatise on Geomorphology**. San Diego: Academic Press, 2013b. p. 125–144.

STOFFEL, M.; SCHNEUWLY, D.; BOLLSCHWEILER, M.; LIÈVRE, I.; DELALOYE, R.; MYINT, M.; MONBARON, M. Analyzing rockfall activity (1600–2002) in a protection forest—a case study using dendrogeomorphology. **Geomorphology**, Amsterdam, v. 68, n. 3/4, p. 224–241, 1 jun. 2005.

STOFFEL, M.; WILFORD, D.J. Hydrogeomorphic Processes and Vegetation: Disturbance, Process Histories, Dependencies and Interactions: HYDROGEOMORPHIC PROCESSES AND VEGETATION. **Earth Surface Processes and Landforms**, Chichester,v. 37, n. 1, p. 9–22, jan. 2012.

STOKES, M.A.; SMILEY, T.L. **An introduction to tree-ring dating**. Tucson: University of Arizona Press, 1996. 73p.

SURDI, P.G.; BORTOLETTTO JUNIOR, G.; RESENDE DE CASTRTO, V.; FERREIRA DE ALMEIDA, N.; FARINASSI MENDES, R.; CHAIX, G.; TOMAZELLO FILHO, M. Perfil de densidade do lenho utilizando métodos radiográficos. **Scientia Forestalis**, Piracicaba, v. 42, n. 102, p. 229–236, 2014.

TELEWSKI, F.W.; SWANSON, R.T.; STRAIN, B.R.; BURNS, J.M. Wood Properties and Ring Width Responses to Long-Term Atmospheric CO2 Enrichment in Field-Grown Loblolly Pine (Pinus Taeda L.). **Plant, Cell and Environment**, Malden, v. 22, n. 2, p. 213–219, fev. 1999.

TELLES, T.S.; DECHEN, S.C.F.; SOUZA, L.G.A. de; GUIMARÃES, M. de F. Valuation and Assessment of Soil Erosion Costs. **Scientia Agricola**, Piracicaba, v. 70, n. 3, p. 209–216, jun. 2013.

TELLES, T.S.; GUIMARÃES, M. de F.; DECHEN, S.C.F. The Costs of Soil Erosion. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, Viçosa, v. 35, n. 2, p. 287–298, abr. 2011.

THOMAZ, E.L.; VESTENA, L.R.; RAMOS SCHARRÓN, C.E. The Effects of Unpaved Roads on Suspended Sediment Concentration at Varying Spatial Scales - a Case Study from Southern Brazil: Effects of Unpaved Roads on Suspended Sediment. **Water and Environment Journal**, Malden, v. 28, n. 4, p. 547–555, dez. 2014.

TICHAVSKÝ, R.; ŠILHÁN, K. Dendrogeomorphic Approaches for Identifying the Probable Occurrence of Debris Flows and Related Torrential Processes in Steep Headwater Catchments: The Hrubý Jeseník Mountains, Czech Republic. **Geomorphology**, Amsterdam, v. 246, p. 445–457, out. 2015.

TIMELL, T.E. **Compression wood in gymnosperms: bibliography, historical background, determination, structure, chemistry, topochemistry, physical properties, origin, and formation of compression wood**. Berlin ; New York: Springer-Verlag, 1986a. v. 1706

TIMELL, T.E. **Compression wood in gymnosperms. occurrence of stem, branch, and root compression wood, factors causing formation of compression wood, gravitropism and compression wood, physiology od compression wood formation, inheritance of compression wood.** Berlin ; New York: Springer-Verlag, 1986b. v. 2 625p.

TOMAZELLO FILHO, M.; LISI, C.S.; ROIG, F.A.; OLIVEIRA, J.T. ; SILVA, J.C.; ROQUE, R. ; BELLOTE, A. A densitometria de raios X aplicada na análise de madeira de árvores de especies tropicais e subtropicais. In: SIMPÓSIO DE CIÊNCIA E TECNOLOGIA DA MADEIRA DO ESTADO DO. RIO DE JANEIRO, 2009. **Anais...** Rio de Janeiro,2009. 2p.

TOY, T.J.; FOSTER, G.R.; RENARD, K.G. **Soil erosion**: processes, predicition, measurement, and control. New York: John Wiley, 2002. 338p.

URI, N.D. Agriculture and the Environment – The Problem of Soil Erosion. **Journal of Sustainable Agriculture**, Binghamton, v. 16, n. 4, p. 71–94, 12 sept. 2000.

VANDEKERCKHOVE, L.; MUYS, B.; POESEN, J.; DE WEERDT, B.; COPPÉ, N. A method for dendrochronological assessment of medium-term gully erosion rates. **Catena**, Amsterdam, v. 45, n. 2, p. 123–161, 29 ago. 2001.

VENEGAS-GONZÁLEZ, A.; CHAGAS, M.P.; ANHOLETTO JÚNIOR, C.R.; ALVARES, C.A.; ROIG, F.A.; TOMAZELLO FILHO, M. Sensitivity of Tree Ring Growth to Local and Large-Scale Climate Variability in a Region of Southeastern Brazil. **Theoretical and Applied Climatology**, Wien,v.123, n.1/2, p.233-245, 4 jan. 2015.

VENEGAS GONZÁLEZ, A.D. **Dendrocronologia de árvores de tectona grnadis l. e pinus caribaea var. hondurensis barr.et golf de plantação da mata da pedreira, campus da Esalq-USP, Piracicaba, Sp.** 2013. 142p Tese de (Mestrado em Ciência Florestais) - Escola Superior de Agricultura “Luiz de Queiroz”, Universidade de São Paulo, Piracicaba, SP, Brasil, 2013.

VERACHTERT, E.; VAN DEN EECKHAUT, M.; POESEN, J.; DECKERS, J. Spatial Interaction between Collapsed Pipes and Landslides in Hilly Regions with Loess-Derived Soils: POORLY DRAINED LANDSLIDES MAY CREATE FAVOURABLE CONDITIONS FOR PIPING. **Earth Surface Processes and Landforms**, Chichester, v. 38, n. 8, p. 826–835, 30 jun. 2013.

VIDAKOVIC, M. **Conifers:** morphology and variation**.** Zagreb, Croácia.: Graficki Hrvatske, 1991. 754p.

VIDAL-TORRADO, P. **Pedogênese e morfogênese no distrito de Tupi (Piracicaba-Sp)**. 1994. Tese de Doutorado em Solos e Nutrição de Plantas. Escola Superior de Agricultura "Luiz de Queiroz", Universidade de São Paulo, Piracicaba, SP, Brasil, 1994.

WISTUBA, M.; MALIK, I.; GÄRTNER, H.; KOJS, P.; OWCZAREK, P. Application of Eccentric Growth of Trees as a Tool for Landslide Analyses: The Example of Picea Abies Karst. in the Carpathian and Sudeten Mountains (Central Europe). **Catena**, Amsterdam, v. 111, p. 41–55, dez. 2013.

WISTUBA, M.; MALIK, I.; WÓJCICKI, K.; MICHAŁOWICZ, P. Coupling between Landslides and Eroding Stream Channels Reconstructed from Spruce Tree Rings (examples from the Carpathians and Sudetes - Central Europe). **Earth Surface Processes and Landforms**, Chichester, v. 40, n. 3, p. 293–312, 15 mar. 2015.

WORBES, M. How to Measure Growth Dynamics in Tropical Trees a Review. **IAWA Journal**, Leiden, v. 16, n. 4, p. 337–351, 1 jan. 1995.

WORBES, M. Annual Growth Rings, Rainfall-Dependent Growth and Long-Term Growth Patterns of Tropical Trees from the Caparo Forest Reserve in Venezuela. **Journal of Ecology**, Malden, v. 87, n. 3, p. 391–403, jun. 1999.

WORBES, M. One Hundred Years of Tree-Ring Research in the Tropics – a Brief History and an Outlook to Future Challenges. **Dendrochronologia**, Jena, v. 20, n. 1/2, p. 217–231, jan. 2002.

WROŃSKA-WAŁACH, D. Dendrogeomorphological analysis of a headwater area in the gorce mountains. **Studia Geomorphologica Carpatho-Balcanica**, Cracow, v. 43, p. 97–114, 2009.

WROŃSKA-WAŁACH, D. Differing Responses to Extreme Rainfall Events in Headwater Areas Recorded by Wood Anatomy in Roots (Gorce Mountains, Poland). **Catena**, Amsterdam, v. 118, p. 41–54, jul. 2014.

WROŃSKA-WAŁACH, D.; SOBUCKI, M.; BUCHWAŁ, A.; GORCZYCA, E.; KORPAK, J.; WAŁDYKOWSKI, P.; GÄRTNER, H. Quantitative Analysis of Ring Growth in Spruce Roots and Its Application towards a More Precise Dating. **Dendrochronologia**, Jena, v. 38, p. 61–71, jun. 2016.

ZHANG, X.; NEARING, M.; NORTON, L. Soil Erosion and Sedimentation. In: SHIRMOHAMMADI, A.; RITTER, W. (Ed.). **Agricultural Nonpoint Source Pollution**. [s.l.] CRC Press, 2000. 352p.

ZHOU, F.; GOU, X.; ZHANG, J.; ZHAO, Z.; CHEN, Q.; CAO, Z. Application of Picea Wilsonii Roots to Determine Erosion Rates in Eastern Qilian Mountains, Northwest China. **Trees -Structure And Function**, New York ,v. 27, n. 2, p. 371–378, abr. 20

ANEXOS

Trincheira 1

LOCALIZAÇÃO: Estação Experimental de Tupi, Município de Piracicaba, Estado de São Paulo.
SITUAÇÃO, DECLIVE E COBERTURA VEGETAL: Trincheira na parte inferior no talude da voçoroca, 9% de declividade, sob área de reflorestamento de *Pinus sp.* e Guarantã.
ALTITUDE:525-550m
LITOLOGIA: Arenitos e diamictitos arenosos
FORMAÇAO GEOLOGICA: Formação Itararé.
PEDREGOSIDADE: Não pedregosa
ROCHOSIDADE: Não rochosa.
RELEVO LOCAL: Ondulado, vertentes de 12 a 30% aproximadamente.
EROSAO: Forte
DRENAGEM: Imperfeitamente drenado
USO ACTUAL: plantação de *Pinus sp* e Guarantã para o desenvolvimento de pesquisas e atualmente em processo de regeneração natural.

DESCRIPÇÃO MORFOLÓGICA

A 0-10 cm; bruno acinzentado escuro (10 YR 4/2); textura arenosa; estrutura moderada granular de tamanho médio grande e blocos subangulares pequenos-médio. Consistência macia, friável, ligeiramente plástica e não pegajosa. Transição gradual plana. Porosidade alta com poros de tamanho medio- grande. Alta atividade biológica. Muitas raízes finas e médias. Presença de uma bolsa de areia de cor branca no meio do perfil de 12 cm aprox. de textura arenosa e em grãos simples. No resto do horizonte o material branco aparece misturado com material preto em forma de mosquedos.

Sed. 10-90 cm; bruno (10 YR 5/3); textura arenosa; estrutura fraca em blocos subangulares pequeno-médio possível aparência devido á umidade do solo e grão simples. Consistência macia, friável, ligeiramente plástica e não pegajosa. Transição gradual plana. Porosidade alta com poros de tamanho meio. Pouca atividade biológica. Presença de duas bolsas de areia em forma de lâminas na primeira parte do horizonte (25 cm) com uma espessura de 2-3 cm. Também, na parte inferior aparecem mosqueados de material mais claro e escuro. Presença de nódulos vermelhos e duros de ferro de menos de 1 cm especialmente na parte inferior do

horizonte. Presença de carvão. Apresenta o início de uma raiz grande que cruza o perfil de forma vertical até chegar no horizonte E.

IIA ent. 90-113 cm; bruno amarelado escuro (10 YR 4/4); textura arenosa; estrutura blocos subangulares pequenos-médio. Moderado. Consistência macia, friável, ligeiramente plástica e não pegajosa. Transição gradual plana. Poros de tamanho meio. Pouca atividade biológica. Presença de carvão e nódulos de 1-2 cm. Pouca presença de raízes sendo elas finas. Raiz grande na lateral. Bolsa de areia no meio do horizonte de 3cm de espessura.

IIE 113-150 cm; bruno amarelado claro (10 YR 6/4); textura arenosa com maior sensação de argila do que nos horizontes superiores; estrutura fraca em blocos subangulares pequeno - médio. Consistência macia, friável, ligeiramente plástico e ligeiramente pegajoso. Transição gradual plana. Pouca porosidade com poros de tamanho medio. Pouca atividade biológica. Pequeno sinal de hidromorfia definida por manchas de cores mais claras e vermelhas.

IIBt 170-258 cm; amarelo bruno (10 YR 6/6); textura media; estrutura moderada em blocos subangulares médio-grande. Consistência ligeiramente dura, firme, plástica e pegajosa. Transição gradual plana. Solo mais denso e pouco poroso. Raízes pouco abundantes, mas de todos os tamanhos e em vertical.

Apresenta mosqueado branco e vermelho dentro de uma matriz amarela. Observa-se nódulos de ferro vermelhos. Presença de uma mancha vermelha e grande na lateral esquerda do perfil. Inicia em 180 cm e acaba em 230cm aprox. Degrau de erosão da voçoroca coincide com o topo do B.

Trincheira 2

LOCALIZAÇÃO: Estação Experimental de Tupi, Município de Piracicaba, Estado de São Paulo.
SITUAÇÃO, DECLIVE E COBERTURA VEGETAL: Trincheira na parte inferior esquerda da área de estudo no talude de uma voçoroca, 14% de declividade, sob mata reflorestada de *Pinus sp.* e Guarantã.
ALTITUDE:525-550 m
LITOLOGIA: Arenitos e diamictitos arenosos
FORMAÇAO GEOLOGICA: formação Itararé.
PEDREGOSIDADE: Não pedregosa
ROCHOSIDADE: Não rochosa.
RELEVO LOCAL: Ondulado, vertentes de 12 a 30% aproximadamente.
EROSAO: Forte
DRENAGEM: Imperfeitamente drenado
USO ACTUAL: plantação de *Pinus sp* e Guarantã para o desenvolvimento de pesquisas e atualmente em processo de regeneração natural.

DESCRIPÇÃO MORFOLÓGICA

A 0-8 cm; bruno (10 YR 4/3); textura arenosa; estrutura moderada granular de tamanho pequena-média e blocos subangulares pequenos. Consistência macia, friável, ligeiramente plástica e não pegajosa. Transição gradual. Alta porosidade com poros classificados como grandes e muito grandes. Muita atividade biológica caracterizada com a presença de coprólitos. Presença abundante de raízes de diversos tamanhos com crescimento vertical. Quando seco, aparecem rachaduras verticais que vão desde o horizonte A até o final do Bt

E 8-58 cm; bruno claro (10 YR 7/4); textura arenosa; estrutura em grão simples. Transição gradual e plana. Porosidade alta com poros de tamanho médio e grande que em ocasiões aparecem preenchidos indicando alta atividade biológica. Observa-se no meio do horizonte um canal preenchido com material de origem biológico de 10 cm de comprimento em vertical e 1-1,5 cm de espessura. Presença de nódulos vermelhos.

Bt 58-130 cm; amarelo bruno (10 YR 6/6); textura média; estrutura moderada - forte em blocos subangulares grande e média. Consistência dura, firme, plástica e pegajosa. Transição plana e gradual. Presença de raízes finas e medias e verticais que diminui com a profundidade.

Muita atividade biológica com canais e poros preenchidos de tamanho grandes e arredondados. Na parte inferior vários canais finos de 5-7 cm de comprimento. Observa-se uma bolsa de areia fina e branca no lado direito do perfil em 90 cm de profundidade aprox. No lado direito aparece uma rachadura proveniente da superfície.

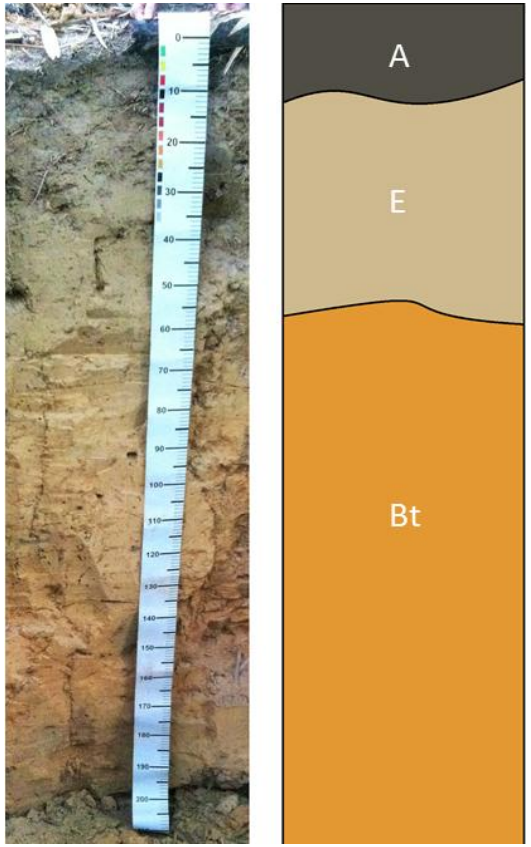


Tabla 1- Análise química do solo por horizontes da trincheira 1 (T1) e 2 (T2) da área de estudo

Horizonte	pH H_20	pH $CaCl_2$	pH KCl	MO	Ca	Mg	K	Al^{3+}	H+Al	SB	CTC	V	m
				g kg^{-1}	----------mmolc kg^{-1}----------							------%------	
T1 A	5,43	4,70	4,51	12,13	10,7	3,17	0,90	5,10	36,40	14,77	56,27	26,24	25,67
T1 Sedimento	5,21	4,19	4,03	4,39	1,70	0,91	0,38	10,10	36,00	2,99	49,09	6,09	77,16
T1 IIA	4,90	4,04	3,98	16,26	0,60	0,09	0,43	18,00	30,40	1,13	49,53	2,28	94,10
T1 II E	5,03	4,05	4,02	5,68	0,05	0,09	0,56	14,20	29,80	0,71	44,71	1,58	95,25
T1 II B	5,09	4,04	3,95	2,07	1,48	0,36	0,61	24,30	29,20	2,46	55,96	4,39	90,81
T2 A	5,30	4,43	4,30	14,71	6,53	1,45	1,00	6,20	29,20	8,98	44,38	20,23	40,85
T2 E	5,18	4,29	4,16	4,39	3,57	1,00	0,97	12,70	36,40	5,54	54,64	10,13	69,64
T2 B	4,37	4,03	3,99	3,87	0,05	0,09	0,43	23,20	32,60	0,58	56,38	1,03	97,56

Tabla 2 - Análise física do solo por horizontes da trincheira 1 (T1) e 2 (T2) da área de estudo.

Identificação	Argila (g/Kh)	Silte (g/Kh)	Areia (g/Kh)	Argila em água	Floculação (%)
T1A	101	109	790	76	25
T1 Sedimento	125	101	774	100	20
T1 IIA Enterrado	125	182	693	75	40
T1 IIE	126	164	710	50	60
T1 IIB	227	197	576	25	89
T2 A	75	100	824	50	33
T2 E	125	165	709	100	20
T2 B	226	134	640	25	89