

**Universidade de São Paulo
Escola Superior de Agricultura “Luiz de Queiroz”**

**Avaliação da sustentabilidade nutricional de plantios de
Pinus taeda L. usando um balanço de entrada-saída de nutrientes**

José Márcio Cossi Bizon

**Dissertação apresentada para obtenção do título de
Mestre em Recursos Florestais, com opção em
Silvicultura e Manejo Florestal**

**Piracicaba
2005**

José Márcio Cossi Bizon
Engenheiro Florestal

**Avaliação da sustentabilidade nutricional de plantios de
Pinus taeda L. usando um balanço de entrada-saída de nutrientes**

Orientador:
Prof. Dr. **JOSÉ LUIZ STAPE**

Dissertação apresentada para obtenção do título de
Mestre em Recursos Florestais, com opção em
Silvicultura e Manejo Florestal

**Piracicaba
2005**

**Dados Internacionais de Catalogação na Publicação (CIP)
DIVISÃO DE BIBLIOTECA E DOCUMENTAÇÃO - ESALQ/USP**

Bizon, José Márcio Cossi

Avaliação da sustentabilidade nutricional de plantios de *Pinus taeda* L. usando um balanço de entrada-saída de nutrientes / José Márcio Cossi Bizon. - - Piracicaba, 2005. 95 p. : il.

Dissertação (Mestrado) - - Escola Superior de Agricultura Luiz de Queiroz, 2005.

1. Balanço de nutriente 2. Biomassa 3. Manejo florestal 4. Nutrição florestal 5. Pinheiro
6. Produtividade florestal 7. Silvicultura sustentável I. Título

CDD 634.9751

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

DEDICATÓRIA

A DEUS e aos meus pais Affonso e Hildaires

pelo dom da vida e pelos valores pessoais que norteiam a minha caminhada.

Aos meus irmãos, minha irmã e meus sobrinhos

por serem a minha bela família e pelo apoio em todos os momentos.

A Agnes que me trouxe a Beatrisse

Que veio para trazer um novo sentido a vida.

AGRADECIMENTOS

Ao Prof. Dr. José Luiz Stape, pela orientação, incentivo e principalmente por ter acreditado na realização deste trabalho.

À Votorantim Celulose e Papel S. A. – Unidade Florestal, nas pessoas do Eng^o José Maria de Arruda Mendes Filho, Eng^o Walter Sales Jacob, Eng^o Geraldo Colli Jr., e Eng^o Fausto Rodrigues Alves de Camargo, pelo incentivo, apoio irrestrito e por acreditar que este projeto seria possível.

À Norske Skog Pisa – Unidade Florestal, na pessoa do Eng^o Admir Lopes Mora e à Valor Florestal na pessoa do Eng^o Edson Antônio Balloni pelo apoio financeiro e também por nos despertar para a importância de se estudar o tema sustentabilidade.

Aos Professores Dr. José Leonardo de Moraes Gonçalves e Dr. Fábio Poggiani, pelo apoio e compreensão e principalmente por ter lançado a semente do cultivo mínimo em minha mente.

Aos colegas Claudio Roberto Silva e Marcos Cesar Passos Wichert pelo companheirismo.

À colega e mestranda Carolina Bozetti Rodrigues, pelo apoio técnico e por não ter poupado esforços em colaborar.

A todos os colegas da Votorantim Celulose e Papel, Norske Skog Pisa e Valor Florestal pelo incentivo e pelas inúmeras colaborações.

Aos amigos e a todas as pessoas que, de alguma forma, contribuíram para a realização desta pesquisa.

SUMÁRIO

RESUMO.....	7
ABSTRACT.....	8
1 INTRODUÇÃO.....	9
2 DESENVOLVIMENTO.....	13
2.1 Revisão de literatura.....	13
2.1.1 O setor florestal brasileiro e o <i>Pinus taeda</i>	13
2.1.2 Fertilização de Pinus no Brasil.....	15
2.1.3 Estoque de nutrientes em povoamentos florestais.....	17
2.1.4 Sustentabilidade das plantações florestais.....	21
2.1.5 Balanço de nutrientes.....	23
2.1.6 Entradas de Nutrientes.....	25
2.1.7 Saídas de Nutrientes.....	26
2.2 Material e métodos.....	30
2.2.1 Seleção dos sítios amostrais.....	30
2.2.2 Caracterização climática dos sítios experimentais.....	34
2.2.3 Volume das parcelas amostrais na idade de inventário.....	38
2.2.4 Volumes produzidos numa rotação padronizada de 25 anos.....	40
2.2.5 Caracterização edáfica dos solos.....	41
2.2.6 Estoque de nutrientes disponíveis nos solos.....	45
2.2.7 Estoques de nutrientes na floresta.....	48

RESUMO

Avaliação da sustentabilidade nutricional de plantios de *Pinus taeda* L. usando um balanço de entrada-saída de nutrientes

O conhecimento da sustentabilidade nutricional dos manejos aplicados às floresta plantadas é necessário para a adequada gestão desses empreendimentos, principalmente com plantações estabelecidas em solos de baixa fertilidade, utilizando a queima de resíduos pré-preparo, e sem a devida reposição nutricional, como é o caso do *P.taeda* em várias regiões do sul do país. Dada a crescente importância econômica da espécie, e considerando a necessidade de se manter, ou aumentar, sua produtividade, estabeleceu-se um estudo visando estimar a sustentabilidade nutricional de cenários de manejo para o *P. taeda* com base em detalhada análise de oito sítios florestais representativos das condições edafo-climáticas da região noroeste do Paraná e sul de São Paulo. Nestes sítios, com idades de 19 a 29 anos, foram instaladas parcelas de inventário, e os estoques de nutrientes disponíveis na floresta (serapilheira, raiz, casca, lenho, galhos, acículas e cones) foram determinados pela amostragem de 4 árvores por sítio, além da serapilheira. Os estoques nos solos, até 100 cm de profundidade, foram determinados pelas análises de fertilidade, para os horizontes de trincheiras descritas próximas às parcelas. Estimativas de produção e estoques de nutrientes foram ajustadas para ciclos de 25 anos, bem como as entradas via precipitação. Os cenários de manejo estudados foram: i) método de colheita (remoção do lenho ou da árvore inteira), ii) manejo de resíduos (cultivo mínimo ou queima), e iii) erosão (sem ou com 2 cm de erosão por rotação). Adotou-se o número de ciclos, dos nutrientes N, P, K, Ca e Mg, necessários para zerar o estoque do sistema solo-floresta como sendo os indicadores de sustentabilidade dos manejos nos sítios. As simulações foram feitas em um modelo de entrada-saída construído em Visual Basic. Os incremento médios anuais (IMA) variaram de 11 a 27 m³ ha⁻¹ ano⁻¹, com índices de sítios de 18 a 29 m, resultado da ampla variação de solos. O IMA apresentou correlação significativa apenas com os teores de nitrogênio mineralizável até 100 cm ($r^2 = 0,722$) e com o fósforo disponível ($r^2 = 0,702$). Estes dois nutrientes também se distinguiram dos demais por estarem mais concentrados na parte aérea do sistema solo-floresta (50 e 66%, respectivamente). A análise do número de ciclos mostrou que o nitrogênio é o único elemento que nunca apresenta balanço positivo, independentemente do cenário de manejo. Todos os nutrientes foram impactados pelo uso da queima contraponto ao cultivo mínimo, pela colheita da árvore inteira *versus* remoção só do lenho, e pela erosão, nesta ordem de relevância. A ordem de risco de limitação nutricional foi: N > P > Mg > K > Ca, baseando-se no número de balanços positivos e ciclos médios para os balanços negativos. Tomando o N como indicador, os sítios mais produtivos tendem a ser menos sustentáveis, para seus níveis de produção, que os sítios mais pobres. Evidencia-se que para a sustentabilidade nutricional do *P.taeda* há necessidade de adotar práticas conservacionistas aliadas a reposições nutricionais em alguns casos.

Palavras-chave: Balanço de entrada e saída; Biomassa; *Pinus taeda*; Produtividade; Sustentabilidade

ABSTRACT

An input-output budget to estimate the nutritional sustainability of *Pinus taeda* L. plantations

The knowledgement of the nutritional sustainability of the practices used in plantations is necessary for its adequate management, mainly when used in low fertility sites, with slash-burning, and with no fertilizer application, like *P.taeda* plantations in south of Brazil. Given the increasing importance of the species, a study was done to investigate the nutritional sustainability of cenarios, based on eight representatives sites of Parana and Sao Paulo States. These sites, within 19 to 29 years-old, were measured and the nutrient stocks was determined by sampling 4 tress per site, plus the forest floor. Soil nutrient stocks were also established based on soil profiles description and analysis. Yield and nutrient stocks were adjusted for a 25-years cycle, together with the nutrient rainfall inputs. The studied cenarios were: i) harvesting (removing just debarked logs or the hole trees), ii) salsh-management (minimum cultivation or burning), iii) erosion (none or 2 cm per cycle). The number of nutrient cycles (N, P, K, Ca and Mg) to zero the soil-forest system stocks were used as the sustainability indicator. Simulations were carried out with a VBA implementd program. Mean annual increments ranged from 11 to 27 m³ ha⁻¹ yr⁻¹, with site index from 18 to 29 m (base age of 25 years). MAI was positively correlated with minerable N ($r^2 = 0,722$) and available P ($r^2 = 0,702$). These two nutrients also differ from the others due to their higher concentrarion on the aboveground part of the soil-forest (50 and 66%, respectjvely). The cycle number analysis showed that N is the only nutrient that never has a positive balance. For all nutrients the most impactant practice is the burning, followed by the hole tree harvesting and then by erosion. The average nutritional limitation risk was: N > P > Mg > K,Ca, based on positive balances and number of cycles. Taking N as the best indicator for sustainability, the most productive sites tend to be the less sustainables, considering their growth rate. The long term sustainability of *P.taeda* palantations depends on the use of conservacionist practices together with fertilization practices in some cases.

Key-words: Biomass; Forest production; Input-output budgets; *Pinus taeda*; Sustainability

1 INTRODUÇÃO

O conhecimento da produtividade atual, e a estimativa da produtividade futura, das florestas plantadas é condição básica para a gestão dos recursos madeireiros de qualquer empreendimento florestal, pois sem estas informações as tomadas de decisões em nível estratégico, tático, ou mesmo, operacional tornam-se de baixa confiabilidade e de alto risco para o empreendedor.

Para obter estas estimativas, os silvicultores baseiam-se em modelos de crescimento que procuram descrever o comportamento da floresta frente a fatores mensuráveis como idade da floresta, densidade populacional e alguma variável que caracterize a qualidade do local em questão, usualmente o índice de sítio. No entanto, estes modelos se mostram fragilizados quando as futuras condições de crescimento das florestas forem diferentes daquelas originalmente existentes, pois as curvas de produção são válidas para as mesmas condições de clima, solo e material genético, não sendo possível deles obterem-se informações sobre a variação da produtividade frente às mudanças climáticas, edáficas, genéticas e principalmente de manejo silvicultural, como fertilizações, queima, preparo de solo, compactação de solo, e exportação de nutrientes (STAPE, 2002).

O patrimônio edáfico tende a ser exaurido pelos ciclos sucessivos de produção devido a perdas de solo que podem ocorrer durante o preparo e colheita e pela exportação de nutrientes com a biomassa. Assim, para um adequado manejo florestal há necessidade de se conhecer seu balanço de entrada e saída dos nutrientes (BARROS; NEVES; NOVAIS, 2000). Dos fluxos de nutrientes, apenas a fertilização e a exportação pela colheita são frequentemente considerados (MELO et al., 1995), e modelos mais completos de Entrada-Saída de nutrientes no ecossistema florestal deparam com dificuldades de mensuração ou estimativas dos demais fluxos, impossibilitando uma abordagem mais completa dos potenciais impactos de diferentes sistemas de manejo florestal (RANGER; TURPAULT, 1999).

Além disso, a grande diversidade geológica e pedológica dos solos florestais condiciona respostas diferenciadas de um mesmo manejo, o que torna a determinação da sustentabilidade dependente do conhecimento preciso dos estoques iniciais e fluxos sítio-específicos. Conhecendo-se de tais valores, torna-se possível simular o impacto de diferentes sistemas de manejo florestal sobre o balanço nutricional, possibilitando aprimorá-lo, ou ao menos, indicar ações preventivas de preparo de solo, manejo de resíduos ou fertilização para mitigar tais efeitos (STAPE, 2002).

As informações disponíveis sobre o manejo de plantações florestais na região tropical mostram que maiores produtividades estão associadas a maiores mobilizações de água e nutrientes (STAPE et al.; 2002). Assim, solos mais férteis podem ser mais impactados pela exportação de nutrientes do que solos menos férteis (menos produtivos), e serem conseqüentemente menos sustentáveis. Porém, tal conclusão depende do seu estoque original de nutrientes e do manejo a que é submetido, de forma que o uma análise de Entrada-Saída, em termos de número de rotações teóricas para zerar os nutrientes disponíveis no sistema se mostra como uma técnica adequada para tais inferências (GONÇALVES et al., 2002; BARROS; COMERFORD, 2002).

A cultura do *Pinus* no sul do Brasil, já ocupava 1.840.050 ha ao final de 2000, sendo o *P.taeda* a espécie de maior expressão econômica na região, tanto pela sua adaptabilidade local, quanto pela qualidade de sua madeira para usos múltiplos (SBS, 2000). Devido ao seu rápido crescimento e ausência de sintomas de deficiência, particularmente nas primeiras rotações, foi disseminada a idéia de que plantações de *Pinus* dispensariam a prática de fertilização mineral e que os preparos com queima favoreceriam a disponibilidade de nutrientes, acumulados na serapilheira, para a próxima rotação (REISSMANN; WISNEWSKI, 2000; FERREIRA et al., 2001;).

Vê-se assim, que a crescente importância econômica da espécie pode vir a ser fragilizada pelo inadequado manejo nutricional de suas florestas. No entanto, a importância relativa dos nutrientes, e seus níveis de impacto, variam, principalmente, em função das características do solo, da produtividade da floresta, e dos manejos florestais

aplicados, em termos de resíduos (cultivo mínimo ou queima), fertilização (com ou sem), grau de erosão, e biomassa colhida (árvores inteiras ou apenas o componente lenho).

Para conhecer tais variabilidades, estudaram-se oito sítios florestais típicos de *P.taeda* no sul do Estado de São Paulo e Nordeste do Estado do Paraná, com ampla diversidade de solos e com produtividades variando de 12 a 26 m³ ha⁻¹ ano⁻¹, próximos ao final do ciclo de 25 anos, com os seguintes objetivos:

i. Identificar os fatores ambientais (clima e solo) mais associados à produtividade do *P. taeda*;

ii. Determinar o estoque de nutrientes (nitrogênio, fósforo, potássio, cálcio e magnésio) disponíveis no sistema solo-floresta e estimar as suas entradas e saídas ao longo de uma rotação;

iii. Estimar o número de rotações de 25 anos para zerar os nutrientes disponíveis no sistema, considerando 3 fatores de manejo: i) Resíduos pós-colheita: cultivo mínimo ou queima; ii) Nível de Erosão pós-plantio: sem erosão ou perda de 2 cm da camada superficial; e iii) Nível de Colheita: retira apenas do lenho sem casca ou retirada da árvore inteira;

iv. Avaliar quais os nutrientes mais críticos para manter a sustentabilidade dos sítios, em termos gerais e sítio-específicos; e

v. Analisar a sustentabilidade dos sítios em função da produtividade florestal.

Assim, foram realizadas intensas amostragens de solo e biomassa nos oito sítios florestais, e utilização de dados de inventário, meteorológicos e de literatura para testarem-se as seguintes hipóteses:

H1. Os sítios mais produtivos possuem os maiores estoques e exportações de nutrientes (STAPE, 2002).

H2. O cultivo mínimo é um manejo mais sustentável que o uso da queima (FISHER; BINKLEY, 2000);

H3. A erosão diminui a sustentabilidade dos sistemas (GONÇALVES, 2002);

H4. A colheita só do lenho é mais sustentável que a colheita de árvores inteiras (GONÇALVES, 2002) e

H5. Os sítios mais produtivos são mais sustentáveis.

2 DESENVOLVIMENTO

2.1 Revisão de literatura

2.1.1 O setor florestal e o *Pinus taeda*

O setor florestal brasileiro tem sido responsável anualmente por aproximadamente 4% do Produto Interno Bruto (PIB), 900.000 empregos diretos, US\$ 450 milhões em arrecadação de impostos e US\$ 4,5 bilhões em exportações de produtos da indústria de base florestal (OLIVEIRA, 2001). No ano de 2000, as florestas plantadas com *Pinus* ocupavam 1.840.050 ha, o que corresponde a 38% do total de florestas plantadas com *Pinus* e *Eucalyptus* no Brasil. No estado do Paraná a área com *Pinus* abrange 605.130 ha e no estado de São Paulo 202.010 ha (SBS, 2000).

Em 1936 foram introduzidas no Brasil as primeiras sementes de *Pinus taeda* pelo Instituto Florestal (KRONKA; BERTOLANI; HERRERA-PONCE, 2005). O *P. taeda* L. cresce naturalmente em 15 estados do sudeste dos EUA. Da Flórida Central (28° N latitude) ao norte para Delaware e New Jersey (39° N, 75° W) e do oeste para leste do Texas e sudeste de Oklahoma (97° 30'). No limite sul da distribuição desta espécie, a média mensal de variação da temperatura é somente de 10°C ao longo do ano, enquanto que a variação da temperatura atinge 25°C no limite norte. Além disso, a variação mensal de precipitação pode ser de 25 mm em Oklahoma e no Texas para mais de 200 mm na Flórida. Esta distribuição abrangente de clima proporciona evidências de que o *P. taeda* apresenta boa plasticidade (SCHULTZ, 1999).

O *P. taeda* é a espécie madeireira mais importante do sudeste dos Estados Unidos. Em 1989, predominava em 13,4 milhões de ha (45%) das terras florestais comerciais. Por possuir regeneração rápida e fácil, e rápido crescimento logo se transformou na espécie florestal preferida no sudeste americano. Além disso, expandiu-se para algumas partes da Ásia, África e América do Sul. Cerca de 400 milhões de mudas estão sendo plantadas anualmente nesses continentes. De 200 a 300 milhões de

mudas/ano são plantadas na China e mais de 100 milhões no Brasil. Uma quantidade menor, mas de importância local, vem sendo plantada anualmente na Argentina, Uruguai, Sul da África e Zimbábue (SCHULTZ, 1999).

O *P. taeda* é uma espécie sub-tropical (HAAG, 1983; KRONKA; BERTOLANI; HERRERA-PONCE, 2005), e as espécies de *Pinus* compreendidas nesse grupo são plantadas em regiões que coincidem com a distribuição natural da *Araucaria angustifolia* (HAAG, 1983). Segundo Shimizu (1997), o *P. taeda* é resistente à geada e a região mais adequada para um bom rendimento abrange desde o extremo sul, sobre o planalto, até o norte do Paraná.

A partir da segunda metade da década de sessenta, o reflorestamento com espécies do gênero *Pinus* foram intensificadas, após a lei dos incentivos fiscais. Áreas foram ocupadas predominantemente com *Pinus taeda* e *Pinus elliotti* var. *elliottii*, formando a base florestal para atividades industriais (SHIMIZU, 1997; FERREIRA et al., 2001). Kronka; Bertolani; Herrera-Ponce, (2005), também destacam que uma das razões mais importantes para a introdução do *Pinus* no Brasil foi a demanda de madeira para o abastecimento industrial, principalmente para o processamento mecânico para produção de madeira serrada, madeira laminada, confecções de painéis e produção de celulose e papel.

A melhoria das árvores e a seleção de sítios apropriados foram fundamentais para a expansão desta espécie em diferentes partes do mundo. Em algumas localizações no Brasil e Argentina o *P. taeda* alcança produtividades médias de 20 a 35 m³ ha⁻¹ ano⁻¹. Estes incrementos médios anuais são três vezes maiores do que áreas similares nos EUA (SCHULTZ, 1999).

2.1.2 Fertilização de *Pinus* no Brasil

Tradicionalmente, devido ao rápido crescimento e ausência de sintomas de deficiência, particularmente nas primeiras rotações, foi disseminada a idéia de que plantações de *Pinus* dispensariam a prática de fertilização mineral (REISSMANN; WISNEWSKI, 2000; FERREIRA et al., 2001).

Este fato é reforçado devido ao relato de produtividades semelhantes ou superiores na segunda rotação. Especula-se que a utilização de material genético com genótipos mais eficientes na extração e aproveitamento de nutrientes e melhores técnicas de implantação e manutenção dos povoamentos florestais estejam, no curto prazo, mascarando as perdas de produtividade pela redução da oferta de alguns nutrientes. Porém, a manutenção da produtividade dos povoamentos, a médio e longo prazo, dependerá da reposição dos nutrientes contidos e exportados com a madeira no processo de exploração florestal e daqueles perdidos durante o manejo da floresta (FERREIRA et al., 2001).

A reposição dos nutrientes removidos, ou perdidos, é necessária em todos os locais que não são capazes de suprir os nutrientes necessários para um bom crescimento a partir do intemperismo de minerais, do aporte via chuva ou da fixação biológica. Isto inclui a maioria dos solos usados para florestas (HAAG, 1983).

Braga (1973), com base em estudos europeus e norte-americanos de adubação em *Pinus*, conclui que a adubação de *Pinus* se tornará um dia necessária no Brasil. Muniz; Baldani; Pellico Netto (1975) apresentaram um ensaio de adubação com N (nitrogênio), P (fósforo) e K (potássio) em *P. taeda* e *P. elliottii* realizado no estado do Paraná. Aos 7 anos houve efeito benéfico à presença de fósforo. Identicamente, Flor (1977) encontrou efeito apenas do fósforo no volume de *P. taeda* no estado do Paraná.

Haag (1983) publicou uma revisão sobre fertilização em *Pinus*. De um modo geral, concluiu que este gênero responde menos à adubação do que o *Eucalyptus*,

porém os incrementos em volume podem atingir 20% ou mais em solos pobres. Além disso, a aplicação de P, K e Ca (cálcio) com Mg (magnésio), na forma calcário, gerou os melhores resultados. Por fim, a aplicação de N mostrou-se de pouco efeito sobre o desenvolvimento das árvores.

Gonçalves (1995) apresentou algumas considerações básicas sobre avaliação da necessidade de adubação e informações e procedimentos relacionados à recomendação de adubação para *Pinus*. Segundo o autor, as quantidades de nutrientes armazenadas nos diferentes componentes exportados da área de produção são, geralmente, maiores para as espécies de *Eucalyptus* do que às de *Pinus*, principalmente para os seguintes nutrientes: K, Ca e Mg. Em seu trabalho, a ordem dos nutrientes mais acumulados para *Eucalyptus* é $Ca > N > K > Mg > P$ e para o *Pinus* $N > K > Ca > Mg > P$. Ainda, segundo Gonçalves (1995) o gênero *Pinus* retira uma quantidade menor de Ca do solo, dessa forma, nas áreas destinadas à implantação dessa espécie pode-se repor as quantidades de Ca e Mg exportadas por meio de fertilizantes que contenham estes nutrientes em sua composição, ao invés da aplicação de calcário. Com relação aos macro e micronutrientes o autor recomenda às espécies de *Pinus* doses de N, P e K de 30-50% daquelas recomendadas para espécies de *Eucalyptus*.

Ferreira et al. (2001) realizaram revisão para *P. elliotii* e *P. taeda* com ênfase em experimentos de adubação de campo. Os autores mantiveram muitos dos objetivos de prioridades de pesquisa traçados por Haag (1983), quais sejam: i) Determinação de critérios e indicadores para avaliação da fertilidade dos solos; ii) Determinação da relação entre ciclagem de nutrientes e produtividade florestal a longo prazo em povoamentos conduzidos sob diferentes sistemas de manejo; e iii) Estabelecimento da necessidade, da época, das dosagens e dos métodos de aplicação de adubos para *Pinus*.

2.1.3 Estoque de nutrientes em povoamentos florestais

Gonçalves et al. (2002) realizaram um balanço hipotético de nutrientes para um Latossolo Vermelho Amarelo distrófico textura média (200 g Kg^{-1} de argila) coberto por plantação de *Eucalyptus grandis*. Constataram que os componentes vegetais (folha, galho, casca e serapilheira) correspondiam a 39 Mg ha^{-1} , equivalentes a 28% do total da massa aérea. Esses componentes continham 57% de N, 61% de P, 51% de K, 76% de Ca e 76% de Mg do estoque de nutrientes da parte aérea. Com a retirada da madeira, os autores estimaram uma exportação do sítio florestal de 224 Kg ha^{-1} de N, 19 Kg ha^{-1} de P, 106 Kg ha^{-1} de K, 110 Kg ha^{-1} de Ca e 16 Kg ha^{-1} de Mg, ou seja, 43% de N, 39% de P, 49% de K, 24% de Ca e 24% de Mg do estoque de nutrientes contido na biomassa aérea.

O conhecimento da demanda nutricional e dinâmica de agregação e compartimentalização da biomassa florestal possibilitam averiguar de forma preliminar o grau do impacto nutricional dos sistemas silviculturais sobre os diferentes sítios florestais. Na Tabela 1 é possível observar que com o crescimento da floresta há um aumento da manta orgânica e, conseqüentemente, de seu estoque de nutrientes. Além disso, observa-se também a compartimentalização da biomassa e o conteúdo dos nutrientes em três florestas de *P. taeda*, em diferentes idades (VALERI, 1988).

Tabela 1 – Biomassa (Mg ha^{-1}) e conteúdo de nutrientes (Kg ha^{-1}) nos diferentes compartimentos de florestas *P. taeda*, aos 7, 10 e 14 anos, em Telêmaco Borba, PR

Idade	Biomassa	N	P	K	Ca	Mg
7 anos	Mg ha^{-1}			Kg ha^{-1}		
Acículas	9,4	188,0	9,3	48,8	26,6	9,0
Ramos	16,7	78,1	4,8	26,8	22,2	6,5
Casca	5,4	22,7	2,1	11,8	10,4	2,4
Madeira	41,2	66,2	5,1	27,5	29,5	6,2
Manta	8,0	62,0	5,0	9,0	42,0	8,0
Idade	Biomassa	N	P	K	Ca	Mg
10 Anos	Mg ha^{-1}			Kg ha^{-1}		
Acículas	9,7	156,0	10,5	43,6	24,4	9,9
Ramos	23,5	98,5	5,6	26,4	29,1	8,4
Casca	10,7	39,3	3,3	15,7	18,3	4,2
Madeira	102,0	123,4	12,8	58,3	80,4	15,2
Manta	20,0	161,0	11,0	9,0	61,0	10,0
Idade	Biomassa	N	P	K	Ca	Mg
14 Anos	Mg ha^{-1}			Kg ha^{-1}		
Acículas	9,4	142,4	8,4	31,3	27,0	10,0
Ramos	28,0	107,5	4,9	22,0	40,8	11,2
Casca	11,4	38,2	3,2	13,7	18,8	5,6
Madeira	135,0	134,4	10,0	53,7	104,3	18,5
Manta	24,0	185,0	13,0	9,0	87,0	14,0

Fonte: VALERI (1988).

Haag et al. (1978) realizaram estudo com povoamentos de *P. taeda* (Tabela 2) e *E. citriodora*, com 20 e 24 anos respectivamente, em Piracicaba, SP, sob argissolo vermelho amarelo. Foram coletadas amostras de folhas, manta orgânica e solo. Os autores concluíram que ambas as espécies contribuíram quantitativamente para o enriquecimento de nutrientes da manta orgânica e do solo. De acordo com Reissmann; Wisniewski (2000) os fluxos de entrada, saída e armazenamento de nutrientes na serapilheira devem ser estudados e levados em consideração em decisões relacionadas ao manejo florestal. Os autores salientam que os fluxos de nutrientes caracterizados pela absorção de nutrientes diretamente da serapilheira são importantes no atendimento da demanda nutricional das árvores.

A quantidade de nutrientes depositada através da serapilheira depende da quantidade produzida e da concentração dos nutrientes. Dessa forma, as acículas (principal componente da serapilheira) podem ser responsáveis pelas maiores transferências de nutrientes para os horizontes orgânicos que se acumulam sobre o solo numa floresta de *Pinus* (WISNIEWSKI; REISSMANN, 1996).

Reissmann; Zottl (1987) estudaram um povoamento de *P. taeda*, com idade de 15 anos, na região de Telêmaco Borba, PR. Devido às evidências de deficiência nutricional foi realizada análise química do solo e das acículas constatando-se deficiências de N, P, K, Mg, Zn e B. Para os autores, sítios deficientes submetidos à intensa exploração por monocultura têm sua qualidade alterada negativamente e atenção deve ser dada às regiões abrangidas pelos arenitos e neossolos quartzarênicos das planícies litorâneas.

Koehler (1989) e Wisniewski; Reissmann (1996) desenvolveram um trabalho no município de Ponta Grossa, PR, em povoamento de *Pinus taeda*, com 15 anos, sob os seguintes solos: Terra bruna estruturada, cambissolo Tb álico e Litólico Tb álico, considerados respectivamente pelos autores como sítio bom, sítio de média qualidade e sítio ruim. Apesar de não encontrarem diferenças significativas entre os sítios quanto à produção de serapilheira, observaram que as maiores quantidades de P, K e Mg foram depositadas no sítio considerado bom e médio (Tabela 2).

Novais e Poggiani (1983) avaliaram a deposição de folhas em povoamentos puros e consorciados com *Pinus caribaea* e *Liquidambar styraciflua*, em Agudos, SP, região de cerrado. Os povoamentos de *Pinus* apresentaram menor deposição de folhas e menor concentração de nutrientes no material depositado. A produção anual de acículas para o *Pinus* foi de 4,4 kg.ha⁻¹ (Tabela 2).

Lopes; Mello; Garrido, (1983) determinaram as quantidades acumuladas de manta orgânica e seus nutrientes sob povoamentos de *P. elliottii* (9, 14 e 19 anos), *P.*

patula (19 anos) e *P. taeda* (19 anos), situados em Latossolo vermelho escuro-fase arenosa, no município de Assis, SP (Tabela 2). Não encontraram diferenças nas quantidades de manta formada e nos conteúdos totais de macronutrientes entre as espécies *Pinus* e as diferentes idades.

Curcio et al. (1993) analisaram a quantidade de serapilheira de *P. taeda* e *P. elliottii* acumulada sobre um cambissolo textura argilosa, no município de Tijucas do Sul, PR (Tabela 2). Soave; Pagano (1994b) também realizaram estudo com *P. elliottii* var. *elliottii*, com 29 anos. A maior quantidade de nutrientes encontrada na serapilheira foi de N, seguido do Ca, K, Mg e P (Tabela 2). Observaram também que o retorno dos macronutrientes seguia uma sazonalidade referente aproximadamente à produção de serapilheira.

Tabela 2 – Produção anual (a) e acúmulo (b) de serapilheira e conteúdo de macronutrientes em plantios de *P. elliotii*, *P. taeda* e *P. caribaea* sobre diferentes tipos de solo

Espécie: <i>Pinus elliotii</i>							
Idade	Solo	Quant.	N	P	K	Ca	Mg
Anos		Mg ha ⁻¹			Kg ha ⁻¹		
29	Latossolo ¹	7,5 ^a	40,2	2,3	6,0	21,0	5,1
		8,1 ^a	40,7	1,9	5,5	20,6	5,0
		8,5 ^a	41,6	1,8	5,2	20,7	5,6
9	LE textura média ²	32,8 ^b	209,9	7,02	38,4	101,6	18,4
14	LE textura média ²	36,9 ^b	414,4	19,9	34,4	119,5	26,8
19	LE textura média ²	29,3 ^b	278,3	10,6	14,6	66,9	11,7
	C textura argilosa ³	20,3 ^b	246,7	7,3	14,2	62,7	12,2

Espécie: <i>Pinus taeda</i>							
Idade	Solo	Quant.	N	P	K	Ca	Mg
Anos		Mg ha ⁻¹			Kg ha ⁻¹		
10	Mineração de Xisto ⁴	4,4 ^a	20,8	2,7	7,9	29,6	6,4
15/16	TBS Textura média argilosa ⁵	8,2 ^a 9,3 ^a	48,1	3,4	7,8	20,6	5,3
	C álico, textura argilosa ⁵	8,5 ^a 8,0 ^a	49,9	2,5	11,0	17,2	5,1
	C álico, textura arenosa ⁵	6,8 ^a 6,4 ^a	41,5	2,5	4,0	16,3	2,5
7	TR dist., muito argilosa ⁶	7,6 ^b	61,8	4,8	8,6	41,8	8,2
10	PE álico/dist., argiloso ⁶	19,7 ^b	161,5	10,7	9,2	61,3	9,7
14	PE álico/dist., argiloso ⁶	24,32 ^b	185,0	13,4	8,4	87,5	14,2
24	PV variação Laras ⁷	14,0 ^b	106,1	5,0	11,8	86,9	14,2

Espécie: <i>Pinus caribaea</i>							
Idade	Solo	Quant.	N	P	K	Ca	Mg
Anos		Mg ha ⁻¹			Kg ha ⁻¹		
10	Solo arenoso ⁸	4,4 ^a	20,3	1,06	9,89	12,73	2,78

Fonte: (1) SOAVE; PAGANO, 1994 a,b; (2) LOPES et al., 1983; (3) CURCIO et al, 1992; (4) KOEHLER, 1989; (5) WISNIEWISKI; REISSMANN, 1996; (6) VALERI, 1988; (7) HAAG et al, 1978; (8) NOVAIS; e POGGIANI (1983).

2.1.4 Sustentabilidade das plantações florestais

A silvicultura tem tradicionalmente ocupado solos que foram utilizados na agricultura e também solos que nunca foram próprios ao uso agrícola. Estes solos freqüentemente são rasos, pedregosos, úmidos, lixiviados, arenosos ou menos férteis do que solos usados na produção agrícola. Em muitas partes do mundo, plantações florestais têm sido estabelecidas em solos de agricultura degradada ou pastagens,

devido à produtividade de muitos desses solos ter sido degradada a ponto de não poderem suportar economicamente a produção de safras agrícolas ou a produção de animais (FOX, 2000).

Espera-se que as florestas plantadas atendam a demanda de madeira para o século XXI. Avanços na seleção genética, práticas de viveiro, preparo de solo, técnicas de plantio, manutenção e colheita tem sido capazes de manter ou aumentar a produtividade a cada rotação. Mas altas produtividades podem cair se o sistema de suporte do solo for degradado. Entender o impacto das práticas de manejo na produtividade potencial é uma responsabilidade de todo os administradores de terras e uma necessidade da silvicultura sustentável (POWRES, 1999; STAPE, 2002).

De acordo com Kimmins (1994), sustentar a produtividade do sítio florestal ao longo do tempo requer o entendimento de como funcionam os ecossistemas florestais e os processos que determinam a produção orgânica total das florestas e a alocação desta produção como mercadoria valorada pela sociedade. Deve-se entender também como distúrbios afetam esta produção e alocação. O manejo intensivo de florestas envolve a manipulação do solo e das condições do talhão para amenizar os fatores que limitam o crescimento das árvores. Práticas silviculturais tais como, preparo do solo, o plantio de mudas geneticamente melhoradas, manipulação da densidade do talhão, controle da competição e fertilização são ferramentas acessíveis para manipular os recursos de um local (FOX, 2000).

Embora o manejo intensivo claramente aumente o crescimento e a produção das florestas, a sustentabilidade a longo prazo de florestas manejadas intensamente tem sido questionada. Para serem sustentavelmente manejadas deve haver manutenção da qualidade do solo e da produtividade a longo prazo (KIMMINS, 1994; FOX, 2000; BARROS; COMERFORD, 2002).

O manejo intensivo pode proporcionar um impacto negativo na qualidade do solo. Contudo, o manejo intensivo pode ser praticado de tal maneira que a qualidade do

solo seja mantida e em alguns casos até melhorada. A chave para a sustentabilidade da qualidade do solo é o manejo específico de acordo com o sítio. Entender os processos e propriedades de um solo específico que afetam e potencialmente limitam a produtividade e identificar os solos que são suscetíveis a mudanças induzidas pelo manejo permitirá o desenvolvimento de regimes de manejo adequados para cada solo (FOX, 2000).

2.1.5 Balanço de nutrientes

O manejo de um povoamento florestal requer o conhecimento de seu balanço nutricional a cada ciclo, e tal quantificação depende da mensuração ou estimativa dos fluxos de entrada e dos fluxos de saída dos nutrientes neste ecossistema (BARROS; NEVES; NOVAIS, 2000).

Os nutrientes movimentam-se no ecossistema florestal através de três ciclos principais: o ciclo geoquímico (o nutriente entra e sai de um determinado ecossistema); o ciclo biogeoquímico (o nutriente circula entre o solo e organismos vivos com um determinado ecossistema) e o ciclo bioquímico ou interno (há uma redistribuição dos nutrientes entre os componentes da biomassa ou órgãos de organismos simples). A importância destes diferentes processos e caminhos de ciclagem de nutrientes nestas três categorias varia entre diferentes nutrientes, espécies de plantas, estágio de vida e tempo em um ciclo de rotação (KIMMINS, 1994).

O nutriente envolvido no processo de ciclagem, quer de forma bioquímica ou biogeoquímica, supre grande parte das necessidades das árvores. Em florestas maduras praticamente todas as necessidades anuais de nutrientes são supridas dessa forma. Porém, para que estes processos ocorram em níveis ótimos de produtividade, é necessário que quantidades adequadas de nutrientes tenham sido acumuladas previamente nos diversos compartimentos das árvores (FERREIRA et al., 2001).

O capital de nutrientes em um ecossistema está particularmente dependente do balanço entre as entradas (“inputs”) e saídas (“outputs”) do ciclo geoquímico. A manutenção ao longo do tempo da produtividade do sítio está estritamente relacionada com a manutenção de um balanço geoquímico positivo de crescimento, limitando nutrientes de rotação para rotação (KIMMINS, 1994).

Os balanços de entrada e saída de nutrientes são um indicador chave da variação da fertilidade do solo e da sustentabilidade do manejo florestal. É um indicador precoce que torna possível a predição de mudanças no solo antes que o impacto no solo e na vegetação apareça. A informação quantitativa dos balanços calculados para rotações é relevante para o manejo, pois pode ser usado em recomendações práticas, como tempo de rotação, intensidade da colheita, otimização da fertilização e preservação do meio ambiente (RANGER; TURPAULT, 1999). Um balanço pode ser calculado como reserva total ou reserva disponível.

De acordo com Ranger; Turpault (1999), nas florestas manejadas extensivamente, a meta é minimizar os distúrbios a fim de manter a capacidade de produção do solo nos níveis anteriores, enquanto que no manejo intensivo a meta é maximizar a produção pela utilização de espécies adequadas, material geneticamente melhorado e tratamentos silviculturais incluindo a fertilização. Segundo ainda esses autores, quando a intensificação da silvicultura é baixa, não há razão para o equilíbrio do balanço de nutrientes ser afetado, pelo menos a médio prazo e sem levar em conta catástrofes naturais. Porém, quando a intensificação da silvicultura é alta, o balanço natural é sempre negativo para todos os nutrientes. Dessa forma, nenhum solo florestal pode sustentar grandes colheitas a longo prazo.

Vale ressaltar, porém, que a fertilidade do solo pode diminuir de acordo com as opções de manejo, como por exemplo, a espécie cultivada, o tempo de rotação, e a intensidade da colheita (RANGER; TURPAULT, 1999; CORBEELS; McMURTRIE, 2002). Segundo Fox (2000) os impactos do manejo florestal na qualidade do solo podem ser negativos e também positivos de acordo com as atividades escolhidas.

Os impactos positivos do manejo florestal na qualidade do solo são (FOX, 2000): as aplicações de fertilizantes; as produções de matéria orgânica e sua ciclagem; e as fixações biológicas de nutrientes (N). Por outro lado, os impactos negativos do manejo florestal na qualidade do solo, são: equipamentos pesados como feller-bunchers, skidders e forwarders são usados na colheita da madeira na maioria das plantações intensivamente manejadas; e as práticas de preparo de solo, como a queimada e o enleiramento utilizados para limpar os resíduos acumulados das operações florestais e facilitar o plantio podem ter um grande impacto na matéria orgânica local e no capital de nutrientes.

2.1.6 Entradas de Nutrientes

Os fluxos de entrada são representados pelo aporte de nutrientes pelas chuvas, intemperismo de minerais primários no solo, fixações biológicas (nitrogênio) e fertilizações (LACLAU et al., 1999; VITAL; LIMA; CAMARGO, 1999; VITAL et al., 1999; BARROS; NEVES; NOVAIS, 2000; GONÇALVES et al., 2000). As saídas são representadas pelas perdas erosivas, perdas durante queimadas, lixiviação profunda e perdas pela colheita (LACLAU et al., 1999; VITAL; LIMA; CAMARGO, 1999; VITAL et al., 1999; FISCHER; BINKLEY, 2000).

Para Ranger; Turpault (1999), as principais entradas em ecossistemas florestais são por intemperismo de minerais do solo e entradas atmosféricas, que podem ser medidos de forma direta através da chuva. Com relação ao intemperismo, é difícil de quantificar e as estimativas utilizadas correntemente não são satisfatórias.

Na tabela 3, encontram-se alguns trabalhos que avaliaram a entrada de nutrientes via precipitação em diferentes localidades.

Tabela 3 – Entrada de nutrientes via precipitação em diferentes localidades

Localidades	PPT	N	P	K	Ca	Mg
	mm	Kg ha⁻¹ ano⁻¹				
Arapoti – PR ⁽¹⁾	1533	3,9	0,3	8,6	19,2	1,8
Entre Rios – BA ⁽²⁾	1700	4,7	0,2	3,6	7,4	4,4
Vale do Paraíba – SP ⁽³⁾	1329	9,7	0,1	4,4	7,4	2,0
Vale do Paraíba – SP ⁽⁴⁾	1282	...	0,7	5,6	2,7	0,6
Cunha – SP ⁽⁵⁾	...	11	0,1	5,1	4,6	0,9
Agudos – SP ⁽⁶⁾	1250	3,2	0,1	3,0	2,0	0,9
Itatinga – SP ⁽⁷⁾	1250	...	2,8	2,7	3,5	1,6

Fonte: (1) OKI, 2002; (2) STAPE, 2002; (3) VITAL; LIMA; CAMARGO, 1999; (4) ARCOVA et al., 1985; (5) OLIVEIRA, 1989; (6) CÂMARA; LIMA; VIEIRA, 2000.

Nota: Sinal convencional utilizado:

... Dado numérico não disponível

São consideradas entradas de importância secundária: entrada de elementos em solução (drenagem lateral, capilaridade) ou em forma sólida (depósitos coluviais); entradas biológicas como pólen, frutos e animais; entradas de fixação simbiótica (em florestas plantadas sem subbosque) ou não simbiótica de nitrogênio e entrada por absorção foliar direta de nitrogênio de depósitos atmosféricos (RANGER; TURPAULT, 1999).

2.1.7 Saídas de Nutrientes

A exportação de nutrientes pela colheita florestal é um fator preocupante com relação à manutenção da produtividade dos sítios florestais, principalmente quando o solo possui baixo suprimento de nutrientes. As explorações intensivas com rotações curtas, sem período mínimo necessário à reposição de nutrientes, são apontadas como as principais responsáveis pelo empobrecimento do solo (FERREIRA, et al, 2001).

Em várias plantações florestais, sobretudo naquelas estabelecidas em solos de baixa fertilidade, constata-se a queda de produtividade de madeira ao longo de sucessivas rotações com uma mesma espécie (STAPE; BENEDETTI, 1997).

Geralmente, a este fato está associado um declínio da fertilidade do solo, causado por um manejo inadequado, que inclui práticas de conservação e preparo de solo nocivo às suas características físicas e químicas, fertilização insuficiente ou desbalanceada, e manejo impróprio dos resíduos culturais. O quadro torna-se mais grave quando são usados materiais genéticos melhorados, como os plantios monoclonais, com alta capacidade de extração de nutrientes (STAPE, 2002).

Diferentemente do patrimônio genético, que pode ser mantido a cada novo ciclo florestal ou substituído por um maior nível de melhoramento, o patrimônio edáfico tende a ser exaurido pelos ciclos sucessivos de produção. Esta exaustão deve-se às perdas de solo que podem ocorrer durante o preparo e colheita (GONÇALVES et al., 2000; FICSHER; BINKLEY, 2000), e pela exportação de nutrientes com a madeira (VALERI, 1988; BARROS; NEVES; NOVAIS, 2000). Além disso, perdas adicionais de nutrientes ocorrem quando da prática da queima, e afetando de forma diferenciada os diversos nutrientes (FICSHER; BINKLEY, 2000).

Thomas; Walsh; Shakesby (1999) conduziram um experimento para verificar as perdas de nutrientes, junto ao sedimento erodido, após a passagem de fogo em florestas de *E. globulus* e *P. pinaster* no centro-norte de Portugal, região caracterizada pelo clima Mediterrâneo úmido. Como resultado os autores relataram que o fogo aumentou as perdas de nitrogênio total, potássio trocável e fósforo disponível na ordem de 3-4 vezes, sendo esse fato atribuído ao aumento da erosão e as altas concentrações de nutrientes na superfície do solo nas florestas queimadas.

Segundo Carter; Foster (2004), a queimada é uma ferramenta antiga, porém ainda grandemente utilizada no manejo de *Pinus* em florestas no sudeste dos EUA, provavelmente devido ao fato de ser relativamente barata e englobar práticas consideradas benéficas como, por exemplo, a remoção de restos da colheita, redução do risco de queimadas naturais, aumento na abundância de certas espécies no sub bosque e manutenção ou restauração de certas condições ecológicas. Contudo, os autores ressaltam que estudos recentes demonstram que as queimadas podem ter um

papel significativo na regulação da produtividade de certos ecossistemas, uma vez que, liberam grandes quantidades de nutrientes essenciais na atmosfera na forma de gases e particulados.

Os efeitos das queimadas na qualidade do ar são grandemente reconhecidos, porém seu impacto potencial nas perdas de nutrientes e mudanças na produtividade do solo tem recebido menos atenção. O efeito do fogo no nitrogênio (N) é importante, uma vez que este nutriente é um dos fatores limitantes mais comuns da produtividade florestal. As perdas combinadas de N e outros elementos através da colheita e queimadas parece exceder consideravelmente as razões de reposição por processos naturais e podem necessitar de aplicações regulares de fertilizantes para manter o capital de nutrientes do local (CARTER; FOSTER, 2004).

Segundo Nearya et al. (1999) queimadas mais severas podem causar volatilização de nutrientes, alterar as razões de mineralização e alterar as razões C:N, o que contribui para perda de nutrientes através de erosão acelerada, lixiviação ou desnitrificação. Além disso, podem ocorrer mudanças no funcionamento hidrológico do solo, degradação das propriedades físicas do solo, diminuição da micro e macrofauna e alterações nas populações microbianas e processos associados a elas. Ainda segundo os autores, o horizonte orgânico é um componente crítico da sustentabilidade do ecossistema, pois este providencia uma cobertura de proteção do solo que reduz a erosão, auxilia na regulação da temperatura do solo, proporciona habitat e substratos para a biota do solo e pode ser a maior fonte de nutrientes facilmente mineralizáveis.

Gonçalves et al. (2002) também ressaltam as queimadas como prejudiciais à produção vegetal, em médio e longo prazo, devido às perdas de nutrientes do ecossistema por volatilização, fluxo de massa, lixiviação e erosão eólica e hídrica. Na Tabela 4 constam alguns estudos que mostram perdas de nutrientes por volatilização e fluxo de massa.

Tabela 4 – Perda de nutrientes de diferentes coberturas florestais pós queimada

Espécie	N	P	K	Ca	Mg
			%		
<i>E. camaldulensis</i> ⁽¹⁾	88	34	31	48	43
<i>Pinus caribaeae</i> ⁽²⁾	80	52	79	78	60
<i>E. grandis</i> ⁽³⁾	86	60	49	11	29

Fonte: Adaptado de (1) Maluf (1991); (2) Waterloo (1994); e (3) Cerri et al. (1998).

Além da perda quantitativa de nutrientes pela queima, há efeito da queima na disponibilidade dos nutrientes residuais às plantas. Assim, as formas orgânicas de P na serapilheira são mais facilmente disponíveis às plantas do que formas minerais no solo que são rapidamente fixadas por argilominerais, o que torna a combustão completa da serapilheira algo ainda mais prejudicial a este elemento (CARTER; FOSTER, 2004).

As propriedades do solo também podem ser influenciadas pelas queimadas. Certini (2005) realizou revisão sobre os efeitos das queimadas sobre as propriedades dos solos florestais. Com relação às propriedades físicas, físico-químicas e mineralógicas o autor destaca: aumento da repelência entre água e solo; diminuição da estabilidade estrutural; aumento da densidade; alteração na distribuição do tamanho das partículas; alteração de pH; alteração na estrutura mineralógica; alterações de cor; alterações no regime de temperaturas. Com relação às propriedades químicas: alterações na quantidade e qualidade de matéria orgânica; aumento de nutrientes disponíveis; diminuição da capacidade de troca; aumento da saturação de base. Com relação às propriedades biológicas: diminuição da biomassa microbiana; mudanças na composição da comunidade microbiana; diminuição da biomassa de invertebrados residentes no solo; mudanças na composição da comunidade de invertebrados residentes no solo.

Finalmente, são consideradas saídas de importância secundária a perda de elementos em solução (drenagem lateral) ou na forma sólida (depósitos coluviais e, algumas vezes, pólen, frutos, animais); perdas gasosas de nitrogênio durante a

denitrificação e volatilização de amônia, e os exudados de raiz (RANGER; TURPAULT, 1999).

Nota-se portanto, que a avaliação precisa de todas as entradas e saídas de nutrientes dos povoamentos florestais torna-se essencial para prever futuros problemas nutricionais (FERREIRA et al. 2001).

2.2 Material e métodos

2.2.1 Seleção dos sítios amostrais

Todos os sítios estudados foram amostrados em áreas da empresa Norske Skog Pisa, localizadas no Noroeste do Estado do Paraná e no Sul do Estado de São Paulo, e que representam regiões típicas de plantio de *P. taeda* da região, possuindo ampla variabilidade de solos, e de produtividades florestais.

Em 1998, a empresa iniciou um projeto de pesquisa (STAPE; MORA; MAESTRI, 1998) que incluía a recomendação da caracterização de seu patrimônio edáfico através de um levantamento exploratório de solos, dirigido para as principais fisionomias da região. Este levantamento foi implementado, culminando com a descrição de 20 perfis pedológicos (Tabela 5) em áreas tidas como representativas da diversidade edafo-climática e de produtividade do *P.taeda* na Empresa (PESSOTTI, 1999).

Em todos os casos, parcelas de inventário foram instaladas e mensuradas próximas às trincheiras descritas. As idades das florestas variavam de 18 a 30 anos (Tabela 6).

Tabela 5 – Local, código e classificação dos solos descritos no levantamento dirigido da Pisa Florestal

Fazenda	Município	Quadra	Código	Classificação Original
Ibiti	Itararé-SP	39/40	LE01	Latossolo Vermelho-Escuro Álico A proeminente txt argilosa relevo suave ondulado
Ibiti	Itararé-SP	51C	LE02	Latossolo Vermelho-Escuro Álico A proeminente txt muito argilosa relevo suave ondulado
Pouso Alto	Itararé-SP	23	LE03	Latossolo Vermelho-Escuro Álico A proeminente txt argilosa relevo suave ondulado
Mocambo	Sengés-PR	14	PV04	Podzólico Vermelho Amarelo Álico A proem. txt media relevo ondulado substrato granito
Morungava 1	Sengés-PR	05	PV05	Podzólico Vermelho Amarelo Álico A proem. txt argilosa relevo ondulado substrato granito
Moquém	Ibaiti-PR	05	PA06	Podzólico Am. Abrupto Álico A mod. txt aren./media rel. ondulado subs. arenito glacial
Moquém	Ibaiti-PR	07	PA07	Podzólico Am. Epieut Álico A mod.txt media/arg relevo ondulado substrato siltito glacial
Moquém	Ibaiti-PR	01B	PV08	Podzólico Verm. Amarelo Álico A mod. txt aren/arg.rel. ondulado substrato arenito glacial
Moquém	Ibaiti-PR	01B	PV09	Podzólico Verm. Amarelo Álico A mod. txt aren./arg.rel. ondulado substrato siltito glacial
Moquém	Ibaiti-PR	09/19	PV10	Podzólico Verm. Amarelo Álico A mod. txt aren./arg.rel. ondulado substrato arenito glacial
Pouso Alto	Itararé-SP	01A	PV11	Podzólico Verm. Amarelo Álico A mod. txt aren./arg.rel. ondulado substrato arenito glacial
Jaguariaíva	Jaguariaíva-PR	21A	CL12	Cambissolo Latossolico Álico A moderado txt media relevo ondulado substrato arenito
Mocambo	Sengés – PR	117B	CL13	Cambissolo Latossolico Álico A proeminente txt media relevo ondulado substrato arenito
Morungava 1	Sengés-PR	05	CL14	Cambissolo Latossolico Álico A proeminente txt argilosa relevo ondulado substrato granito
Morungava 1	Sengés-PR	02	CH15	Cambissolo Latossolico Humico Álico txt argilosa relevo ondulado substrato granito
Morungava 1	Sengés-PR	71A	CH16	Cambissolo Latossolico Humico Álico txt argilosa relevo ondulado substrato granito
Moquém	Ibaiti-PR	08B	CB17	Cambissolo Epieutrofico A moder. txt argilosa relevo ondulado substrato folhelho glacial
Jaguariaíva	Jaguariaíva-PR	02A	LI18	Litossolo Álico A moderado txt arenosa relevo ondulado substrato arenito
Mocambo	Sengés-PR	22A	LI19	Litossolo Álico A moderado txt arenosa relevo ondulado substrato arenito
Mocambo	Sengés-PR	117B	LI20	Litossolo Álico A proeminente txt media relevo ondulado substrato arenito

Fonte: PESSOTTI, 1998.

Tabela 6 – Características das florestas de *P. taeda* e da geomorfologia das trincheiras descritas

Código	IS¹ (m)	Plantio (ano)	Relevo regional	Grupo/Formação	Drenagem	Prof. (cm)	Textura
LE01	24	1979	Suave Ondulado	Tubarão/Itararé	Boa	200	Argilosa
LE02	19	1979	Suave Ondulado	Tubarão/Itararé	Boa	200	Muito argilosa
LE03	17	1969	Suave Ondulado	Tubarão/Itararé	Boa	200	Argilosa
PV04	18	1971	Ondulado	Granitos Indiferenciados	Boa	200	Arenosa/média
PV05	28	1971	Ondulado	Granitos Indiferenciados	Boa	200	Argilosa/média argilosa
PA06	24	1973	Ondulado	Tubarão/Itararé	Boa	88	Arenosa/média
PA07	19	1974	Ondulado	Tubarão/Itararé	Boa	142	Média/argilosa
PV08	21	1974	Ondulado	Tubarão/Itararé	Boa	105	Arenosa/argilosa
PV09	19	1974	Ondulado	Tubarão/Itararé	Boa	170	Arenosa/argilosa
PV10	19	1974	Ondulado	Tubarão/Itararé	Boa	188	Arenosa/argilosa
PV11	14	1969	Suave Ondulado	Tubarão/Itararé	Moderada	170	Arenosa/argilosa
CL12	22	1970	Ondulado	Paraná/Furnas	Boa	200	Média
CL13	18	1972	Ondulado	Paraná/Furnas	Boa	200	Média
CL14	24	1971	Ondulado	Granitos Indiferenciados	Boa	200	Argilosa
CH15	22	1972	Ondulado	Granitos Indiferenciados	Boa	200	Argilosa
CH16	28	1973	Ondulado	Granitos Indiferenciados	Boa	200	Argilosa
CB17	21	1974	Ondulado	Tubarão/Itararé	Boa	47	Argilosa
LI18	16	1970	Ondulado	Paraná/Furnas	Moderada	29	Arenosa
LI19	18	1971	Ondulado	Paraná/Furnas	Moderada	26	Arenosa
LI20	17	1991	Ondulado	Paraná/Furnas	Moderada	52	Média

Fonte: PESSOTTI, 1998.

(1) IS = Índice de Sítio (m) para Idade Base de 25 anos.

A classificação dos solos de acordo com seus grandes grupos e geologia foi utilizada como uma forma de estratificação para a amostragem para fins de sustentabilidade. Assim, na Tabela 7 é apresentado um quadro sintético da distribuição das unidades descritas de acordo com os grandes grupos e geologia.

Tabela 7 – Distribuição dos 20 solos classificados no levantamento dirigido de acordo com a geologia e grande grupo de solo

Grupo de solo	Solo	Sítio – Código
Grupo Paraná – Formação Furnas	Litossolo	LI18, LI19, LI20
Grupo Paraná – Formação Furnas	Cambissolo	CL12, CL13
Suítes Graníticas	Cambissolo	CH14, CH15, CH16
Suítes Graníticas	Podzólico Vermelho Amarelo	PV04, PV05
Grupo Paraná – Formação Itararé	Cambissolo	CB17
Grupo Paraná – Formação Itararé	Podzólico Vermelho Amarelo	PV08, PV09, PV10, PV11
Grupo Paraná – Formação Itararé	Podzólico Amarelo	PA06, PA07
Grupo Paraná – Formação Itararé	Latossolo Vermelho Escuro	LE01, LE02, LE03

Pela Tabela 7 identificaram-se os 8 grupos de geologia/solo que cobrem as situações edáficas estudadas, que vão de condições arenosas, como a Formação Furnas, a argilosas, como a Formação Itararé; e de situações de baixa fertilidade (Formação Furnas e Itararé) a média fertilidade (Suítes Graníticas). Além disso, a classificação do solo espelha as ações do relevo e intemperismo na profundidade dos perfis, que vão de rasos (Litossolos e Cambissolos) a muito profundos (Latossolos).

No entanto, as informações analíticas foram utilizadas com o objetivo de auxiliar ainda mais o processo de amostragem para fins de sustentabilidade. Dessa forma, utilizaram-se os atributos físicos e químicos das trincheiras para uma análise multivariada de agrupamento das trincheiras. A Figura 1 apresenta o dendrograma de agrupamento das trincheiras efetuadas através da distância euclidiana média no software SAS ®, e tendo como atributos os teores de areia, silte e argila, o teor de matéria orgânica, soma de bases e CTC.

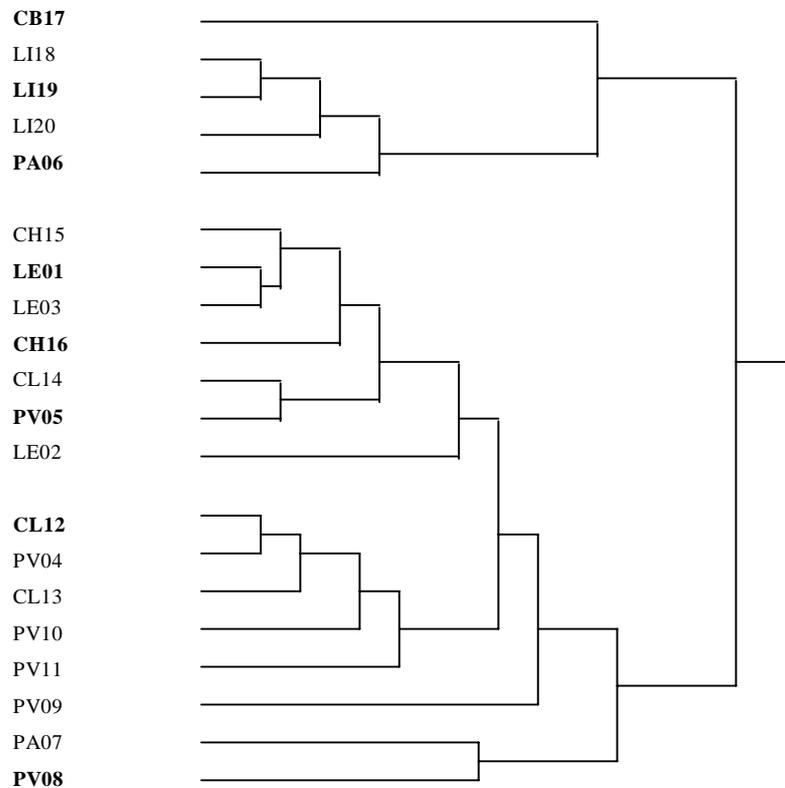


Figura 1 – Dendrograma de agrupamento das trincheiras com base nos atributos físicos (areia, silte e argila) e nos atributos de fertilidade (matéria orgânica, soma de bases e CTC), através da distância euclidiana média.

Com base no dendrograma e na Tabela 7, identificaram-se oito sítios que representariam a diversidade geológica e edáfica da região, os quais estão em negrito no dendrograma com os códigos CB17, LI19, PA06, LE01, CH16, PV05, CL12 e PV08 (Tabelas 6 e 7).

2.2.2. Caracterização climática dos sítios experimentais

As áreas florestais estão localizadas em latitudes superiores a 24° Sul (Tabela 8), em Clima Subtropical/Temperado Úmido, com chuvas de verão, porém sem período seco pronunciado no inverno, com classificação Cf, segundo Koeppen. Há distinção

apenas quanto às temperaturas de verão, mais quentes (temperatura do mês mais quente superior a 22°C) (Subtropical - Cfa) ou mais amenas (Temperado - Cfb).

Face a estas características, a evapotranspiração potencial e real tendem a ser iguais, pois nas épocas mais quentes há maior disponibilidade hídrica (verão), e nas épocas mais frias há precipitação suficiente para os baixos valores evapotranspirativos.

Assim, o déficit hídrico tende a ser baixo ou nulo, mesmo para solos com capacidades de armazenamentos inferiores a 30 mm. Os déficits só serão significativos em anos extremamente secos e invernos quentes (evento raro) ou em solos litólicos/arenosos, de baixa retenção hídrica. As Tabelas 8, 9 e 10, e a Figura 2, apresentam os balanços hídricos por Thornthwaite & Mather (1955), para diferentes períodos de acompanhamento climatológico de cinco postos meteorológicos da Norske Skog Pisa.

Observa-se que nas áreas de clima Cfa as evapotranspirações situam-se entre 900 e 950 mm e temperaturas médias anuais de 19 a 20°C, enquanto no Cfb situam-se entre 800 e 850 mm, com temperaturas médias anuais de 17 a 19°C, caracterizando uma condição mais amena.

Tabela 8 – Balanço hídrico (THORNTHWAITE; MATHER, 1955), para os postos Moquém e Pouso Alto, que apresentaram classificação final como Cfa, para 50mm de capacidade de água disponível

Cfa	Moquém – 1991 a 1997				Pouso Alto – 1978 a 1997			
	Mês	TEM ¹	PPT ²	ETP ³	ETR ⁴	TEM ¹	PPT ²	ETP ³	ETR^{4}
Jan.	23,5	329	118	118	22,9	248	113	113
Fev.	23,6	166	103	103	23,2	171	101	101
Mar.	22,5	134	97	97	22,6	125	100	100
Abr.	21,2	94	77	77	20,5	87	74	74
Mai.	18,8	107	57	57	17,7	125	53	53
Jun.	16,8	133	41	41	15,6	95	38	38
Jul.	16,9	55	44	44	15,8	69	41	41
Ago.	18,6	40	57	55	17,2	56	51	51
Set.	19,6	165	66	66	17,6	130	55	55
Out.	20,9	142	84	84	20,0	118	80	80
Nov.	23,0	127	107	107	21,7	125	96	96
Dez.	23,6	188	120	120	22,4	201	109	109
Ano	20,7	1680	976	974	19,7	1550	917	917

(1) TEM = Temperatura média (°C); (2) PPT = Precipitação (mm); (3) ETP = Evapotranspiração potencial (mm); (4) ETR = Evapotranspiração real (mm).

Tabela 9 – Balanço hídrico (THORNTHWAITE; MATHER, 1955), para os postos Ouro Verde e Mocambo, que apresentaram classificação final como Cfb, para 50mm de capacidade de água disponível

Cfb	Ouro Verde – 1985 a 1997				Mocambo – 1976 a 1997			
	Mês	TEM ¹	PPT ²	ETP ³	ETR ⁴	TEM ¹	PPT ²	ETP ³	ETR^{4}
Jan.	22,0	258	108	108	21,8	261	106	106
Fev.	21,5	201	89	89	22,0	177	94	94
Mar.	20,9	144	89	89	21,1	156	90	90
Abr.	19,6	92	71	71	19,0	95	67	67
Mai.	16,2	144	48	48	16,5	127	49	49
Jun.	14,5	96	37	37	14,4	117	36	36
Jul.	14,6	64	39	39	14,5	86	38	38
Ago.	15,4	56	45	45	15,6	61	46	46
Set.	16,1	142	51	51	16,7	143	54	54
Out.	18,4	136	72	72	19,1	146	76	76
Nov.	20,2	128	87	87	20,7	147	91	91
Dez.	21,2	211	102	102	21,3	241	102	102
Ano	18,5	1672	844	844	18,3	1757	853	853

(1) TEM = Temperatura média (°C); (2) PPT = Precipitação (mm); (3) ETP = Evapotranspiração potencial (mm); (4) ETR = Evapotranspiração real (mm).

Tabela 10 – Balanço hídrico (THORNTHWAITE; MATHER, 1955), para o posto Jaguariaíva, que apresentaram classificação final como Cfb, para 50mm de capacidade de água disponível

Cfb Mês	E10 – Jaguariaíva – 1987 a 1997			
	TEM ¹	PPT ²	ETP ³	ETR ⁴
Jan.	20,6	336	98	98
Fev.	19,9	238	80	80
Mar.	19,3	167	79	79
Abr.	18,5	113	67	67
Mai.	15,5	151	47	47
Jun.	14,2	147	38	38
Jul.	14,6	71	42	42
Ago.	15,6	62	50	50
Set.	16,0	176	53	53
Out.	17,5	151	69	69
Nov.	18,6	141	78	78
Dez.	19,7	218	92	92
Ano	17,5	1971	798	798

(1) TEM = Temperatura média (°C); (2) PPT = Precipitação (mm); (3) ETP = Evapotranspiração potencial (mm); (4) ETR = Evapotranspiração real (mm).

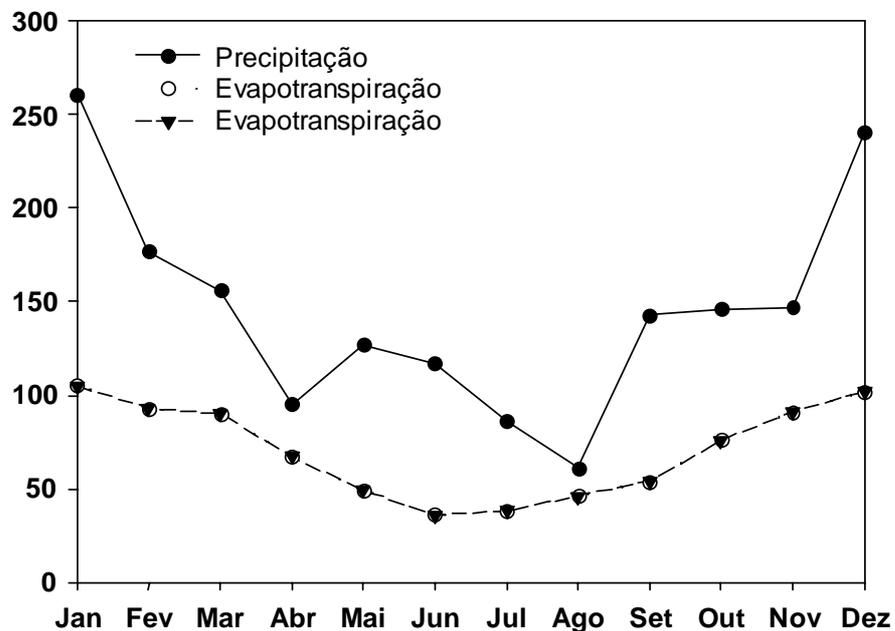


Figura 2 – Balanço hídrico climatológico para a região de estudo no PR, utilizando os dados históricos de 1976 a 1997 (Dados posto Mocambo). Não há déficit hídrico, mesmo para uma capacidade de água disponível de apenas 13 mm, do litossolo arenoso com 50 cm de profundidade (LI1)

2.2.3 Volume das parcelas amostrais na idade de inventário

Concomitantemente à descrição dos perfis de solos, foram instaladas e mensuradas parcelas de inventário próximas das trincheiras, com áreas de 200 m², 400 m² ou 800 m², a depender do número de árvores existentes. Assim, nas áreas sem desbaste instalaram-se as parcelas de 200 m², enquanto as de 800 m² ocorreram nas áreas que já tinham 2 ou 3 desbastes. O número de árvores por parcela variou de 11 a 27, e mediram-se todos os diâmetros à altura do peito (DAP) e altura de 20% das árvores, incluindo as dominantes. A Tabela 11 resume as características das parcelas de inventário instaladas.

Tabela 11 – Dados das parcelas de inventário instaladas em agosto de 1998, em termos de idade, área, densidade de árvores e número e idade dos desbastes realizados

Sítio Sigla	Idade Anos	Área Parcela m²	Árvores Parcela Árvores parcela⁻¹	Desbaste Número (idade)
LI1	28	800	24	2 (10 ^o e 21 ^o ano)
PV2	25	200	27	Sem desbaste
CL3	29	400	16	2 (10 ^o e 21 ^o ano)
CB4	25	200	19	Sem desbaste
LE5	19	400	19	1 (8 ^o ano)
PA6	25	200	18	Sem desbaste
PV7	27	800	14	2 (8 ^o e 19 ^o ano)
CH8	25	800	11	3 (8 ^o , 13 ^o e 19 ^o ano)

Com base nestas medições, e usando a curva guia do *P.taeda* estabelecido com 83 parcelas de inventário da empresa, estimaram-se os índices de sítio das parcelas, para uma idade base de 25 anos, pela equação (1):

$$\ln(IS) = \ln(H_D) + 3,1161 \cdot \left(\frac{1}{Id} - \frac{1}{25} \right) \quad (1)$$

Onde:

IS = Índice de Sítio, em metros, para idade base de 25 anos;

H_D = Altura dominante, em metros, na Idade Id;

Id = Idade, em anos, no inventário.

A determinação do volume total por hectare em cada sítio foi calculada pela soma dos volumes individuais das árvores mensuradas, e expandindo-se para hectare com base na área de cada parcela. O volume de cada árvore foi determinado através de equação volumétrica (2) sítio-específicas do *P. taeda* estabelecida na empresa:

$$\ln(Vol) = b_0 + b_1 \cdot \ln(D) + b_2 \cdot \ln\left(\frac{H^2}{H - 1,30}\right) \quad (2)$$

Onde:

Vol = Volume da árvore, em m³;

D = DAP da árvore, em cm;

H = Altura total da árvore, em m;

b_0 , b_1 e b_2 = coeficientes estimados.

Na Tabela 12 são apresentados os coeficientes para equações de *P. taeda*, para cada região estudada. As alturas das árvores em que se mediram apenas os DAPs foram estimadas por equações hipsométricas geradas para cada parcela, através do modelo (3): $\ln(H) = a_0 + a_1/DAP$.

$$\ln(H) = a_0 + \frac{a_1}{DAP} \quad (3)$$

Onde:

H = Altura total da árvore, em m;

a_0 e a_1 = Coeficientes estimados

DAP = Diâmetro na altura do peito em cm;

Tabela 12 – Coeficientes das equações volumétricas de *P.taeda* para o modelo (2)

Sítio	b_0^1	b_1^1	b_2^1
L11	-11,3163	2,016161	1,267054
CL3	-11,0262	1,854647	1,356837
PV2, CB4, PA6	-11,2213	1,925616	1,340290
LE5	-11,2585	2,098531	1,166352
PV7, CH8	-9,83955	1,967051	0,871170

(1) b_0 , b_1 e b_2 = coeficientes estimados.

2.2.4 Volumes produzidos numa rotação padronizada de 25 anos

Face à existência de diferentes idades e manejos (número e intensidade dos desbastes) entre os povoamentos de *P.taeda* estudados (Tabela 11), houve a necessidade de se definir uma rotação padrão para a espécie e região, como forma facilitar a interpretação dos dados de sustentabilidade a serem obtidos. Com base no histórico da própria empresa, a idade de 25 anos, foi selecionada como sendo aquela que, em média, representa uma rotação típica de *P.taeda* na região (STAPE; MORA; MAESTRI, 1998).

Assim, para todas as parcelas, estimaram-se os volumes totais produzidos até a idade do inventário, adicionando-se os volumes removidos nos desbastes, se existentes. Este volume real total produzido, dividido pela idade do inventário, forneceu o incremento médio anual (IMA, em $\text{m}^3 \text{ha}^{-1} \text{ano}^{-1}$) de cada sítio. Finalmente, os pequenos

ajustes entre os volumes totais produzidos nas idades reais das parcelas (com 19, 27, 28 ou 29 anos, Tabela 11) e o ciclo padrão de 25 anos, foram feitos através da soma, ou subtração, dos incrementos médios anuais necessários. Assim, por exemplo, para o sítio PV7, com 27 anos, subtraíram-se dois IMAs para estimar o volume aos 25 anos.

Para os sítios PV2, CB4 e PA6, os volumes de inventário foram os próprios volumes para ciclos de 25 anos, pois as parcelas já estavam com esta idade, e nunca haviam sofrido desbastes (Tabela 15). Já para as demais parcelas, com 1, 2 ou 3 desbastes, estimaram-se os volumes removidos nestes desbastes com base nos valores médios removidos no desbaste daqueles projetos existentes no histórico da empresa (¹Cardoso, informação pessoal), obtendo-se os volumes totais, e depois ajustando-os para a rotação padrão de 25 anos.

2.2.5. Caracterização edáfica dos solos

Uma vez definidos os sítios amostrais representativos da variabilidade regional, eles foram georeferenciados, recodificados (Figura 3, Tabela 13) e renomeados de acordo com a nova Classificação Brasileira de Solos (EMBRAPA, 1999) (Tabela 14).

A nova sigla associada aos sítios objetivou facilitar a apresentação e discussão dos resultados. Assim, os sítios mantiveram as 2 primeiras letras para associar ao tipo de solo (LI = Litossolo, PV = Podzólico Vermelho Amarelo, PA = Podzólico Amarelo, CL = Cambissolo Latossólico, CB = Cambissolo Epieutrófico, CH = Cambissolo Latossólico Húmico e LE = Latossolo Vermelho Escuro) e foram numerados de 1 a 8, de acordo com a produtividade florestal crescente (detalhamento no item 2.2.5), mas que pode ser vista na Tabela 8 através dos índices de sítios crescentes. Assim, o LI1 é o sítio menos produtivo, e o CH8 é o sítio mais produtivo dos sítios.

¹ CARDOSO, D.J. Mensagem eletrônica recebida em 12 julho de 2005.

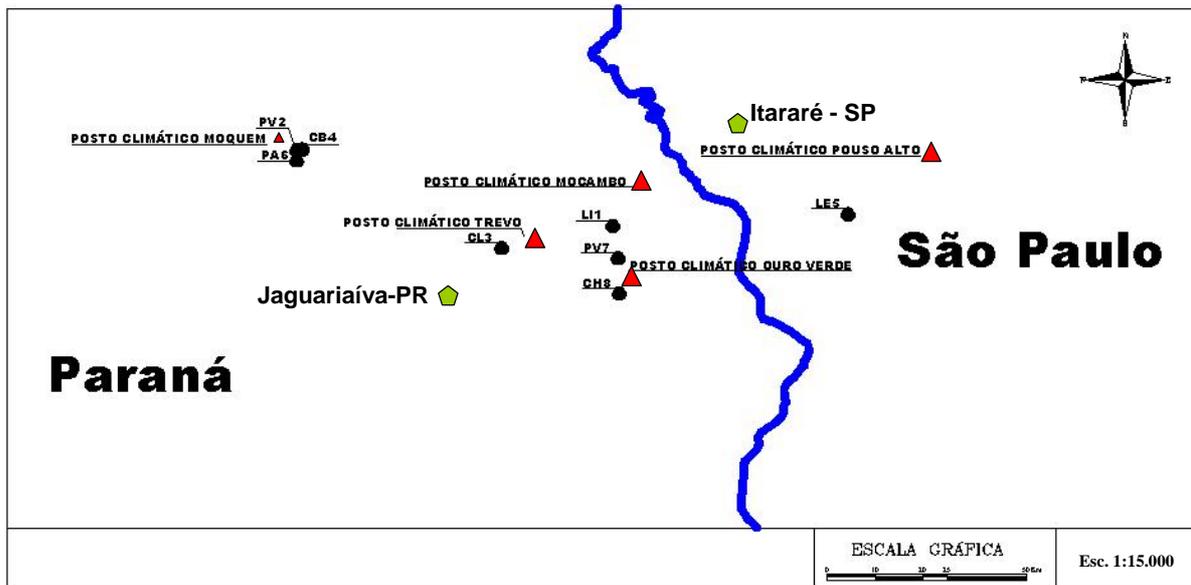


Figura 3 – Localização dos oito sítios florestais e dos 5 postos climáticos utilizados no estudo

Tabela 13 – Código original, nova sigla, localização, data de plantio e índice de sítio (IS, para idade base de 25 anos) dos oito sítios amostrais do estudo

Código Original	Sigla Nova	Latitude (S)	Longitude (W)	Altitude (m)	Plantio ano	IS (m)
LI19	LI1	24° 15' 37"	49° 25' 44"	1050	1971	18,6
PV08	PV2	24° 02' 37"	50° 12' 02"	775	1974	21,5
CL12	CL3	24° 19' 21"	49° 44' 54"	1101	1970	22,7
CB17	CB4	24° 02' 21"	50° 11' 02"	703	1974	21,0
LE01	LE5	24° 13' 37"	49° 17' 23"	1038	1979	24,9
PA06	PA6	24° 04' 13"	50° 12' 02"	811	1973	25,9
PV05	PV7	24° 21' 05"	49° 24' 56"	968	1971	28,0
CH16	CH8	24° 27' 04"	49° 24' 35"	971	1973	28,8

Tabela 14 – Perfis e classificações dos solos dos 8 sítios amostrais conforme a nova classificação brasileira

(continua)

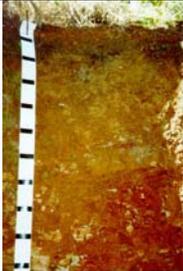
Sítio	Sigla	Prof.(cm)	Classificação Brasileira (1)
	LI1	50	NEOSSOLO LITÓLICO Distrófico típico, A moderado, álico, textura arenosa, relevo ondulado, substrato arenito, Formação Furnas.
	PV2	105	ARGISSOLO VERMELHO AMARELO Distrófico típico, A moderado textura arenosa/argilosa, relevo ondulado, substrato arenito, formação Itararé
	CL3	200	CAMBISSOLO HÁPLICO Tb Distrófico, A moderado, textura média, relevo ondulado, substrato arenito, formação Furnas.
	CB4	47	CAMBISSOLO HÁPLICO Tb Distrófico (epieutrófico) lítico, A moderado textura argilosa, relevo ondulado, substrato folhelho Formação Itararé.

Tabela 14 – Perfis e classificações dos solos dos oito sítios amostrais conforme a nova classificação brasileira

Sítio	Sigla	Prof. (cm)	Classificação Brasileira (1)
	LE5	200	LATOSSOLO VERMELHO Distrófico típico, A proeminente, textura muito argilosa, relevo suavemente ondulado.
	PA6	88	ARGISSOLO AMARELO Distrófico típico, A moderado, textura arenosa/média, álico, relevo ondulado, substrato arenito, Formação Itararé.
	PV7	200	ARGISSOLO VERMELHO Distrófico latossólico, A proeminente, textura argilosa /argilosa, álico, relevo ondulado, substrato granito.
	CH8	200	CAMBISSOLO HÚMICO Distrófico latossólico, textura argilosa, álico, relevo ondulado substrato granitos indiferenciados.

Fonte: (1) EMBRAPA, 1999.

2.2.6. Estoque de nutrientes disponíveis nos solos

Nota-se pela Tabela 14 ampla variação de profundidade dos solos (fita graduada com marcas a cada 10 cm) e materiais de origem, originando distintos atributos físicos (Tabela 15) e de fertilidade (Tabela 16) destes solos.

As análises físicas e químicas dos solos foram efetuadas no Laboratório do Departamento de Solos da ESALQ/USP seguindo as metodologias de análises conforme estabelecido pelo Instituto Agrônomo de Campinas (IAC). Para a determinação do nitrogênio total por horizonte, de cada trincheira, utilizou-se o Laboratório da Colorado State University, em equipamento LECO (Tabela 16).

Tabela 15 – Características físicas dos solos dos oito sítios estudados

Solo	Hor ¹	PI ²	PF ³	Areia	Silte	Argila	Dens.	P ⁴	U1/3 ⁵	U15 ⁶	AD ⁷
		cm			%		g cm ⁻³		%		mm cm ⁻¹
LI1	A	0	50	88	4	8	1,31	44	9	7	0,26
PV2	A1	0	16	64	16	20	1,17	56	9,25	7,65	0,19
	A2	16	33	54	16	30	1,39	49	...	...	...
	Bt	33	105	23	21	56	1,37	47	13,6	11,5	0,29
CL3	A1	0	33	73	5	22	1,33	47	9,8	8,65	0,15
	Bi1	33	72	67	8	25	1,28	51	...	...	...
	Bi2	72	127	65	8	27	1,29	49	11,8	9,53	0,3
	Bi3	127	175	64	8	28	1,42	49	...	...	...
	C	175	200	68	8	24	1,10	58	...	...	...
CB4	A1	0	15	47	6	47	0,94	64	...	...	...
	Bi	15	42	12	11	77	1,15	56	24	22,1	0,22
LE5	A1	0	17	56	4	40	1,03	61	16,6	14,4	0,22
	A2	17	40	51	4	45	1,06	61	...	...	...
	Bw1	40	88	45	4	51	0,94	66	...	...	...
	Bw2	88	200	37	8	55	1,06	61	21	18	0,32
PA6	A	0	26	78	8	14	1,32	50	8,42	7,17	0,17
	E	26	47	76	10	14	1,42	46	...	...	...
	Bt	47	88	64	12	24	1,45	45	12,4	11	0,22
PV7	A1	0	15	49	4	47	1,01	62	23	20	0,31
	A2	15	40	43	9	48	1,24	53	23	20	0,37
	Bt1	40	75	38	7	55	1,21	54	25	22	0,36
	Bt2	75	200	34	10	56	1,26	52	25	22	0,38
CH8	A1	0	25	54	13	33	0,9	64	17,4	16,3	0,11
	A2	25	88	52	10	38	1,00	60	...	...	...
	Bi1	88	132	46	10	44	1,08	59	...	...	...
	Bi2	132	200	42	13	45	1,24	50	19,7	18,3	0,16

(1) Hor = Horizonte; (2) PI = Profundidade inicial; (3) PF = Profundidade final; (4) P = Porosidade; (5) U1/3 = umidade a 1/3 atm; (6) U15 = Umidade a 15 atm; (7) AD = água disponível.

Nota: Sinal convencional utilizado:
... dado numérico não disponível

Tabela 16 – Características de fertilidade dos solos dos oito sítios estudados

Sítio	Horz ¹	PI ²	PF ³	pH	C ⁴	N ⁵	P	Ca	Mg	K	Al	H+Al	CTC
LI1	A	0	50	4	0,475	0,030	3	1	1	0,5	10	44	46
PV2	A1	0	16	4	2,172	0,166	6	20	6	1	6	47	74
	A2	16	33	4	0,629	0,066	6	23	6	1	5	28	58
	Bt	33	105	4	0,483	0,034	2	3	2	1	29	41	47
CL3	A1	0	33	4	0,862	0,063	3	1	1	1	24	73	76
	Bi1	33	72	4	0,801	0,042	1	1	1	1	19	54	57
	Bi2	72	127	4	0,681	0,035	2	1	1	0	15	44	46
	Bi3	127	175	4	0,639	0,051	1	1	1	0	8	18	20
	C	175	200	4	0,245	0,036	2	1	1	1	19	26	29
CB4	A1	0	15	4	2,765	0,254	6	72	21	5	2	61	159
	Bi	15	42	4	1,691	0,157	3	7	6	4	56	95	112
LE5	A1	0	17	4	2,148	0,111	4	2	1	1	20	89	93
	A2	17	40	4	1,526	0,071	3	1	1	1	14	77	80
	Bw1	40	88	4	0,802	0,034	2	1	1	1	10	60	63
	Bw2	88	200	4	0,836	0,045	2	1	1	0	3	39	41
PA6	A	0	26	4	1,359	0,099	4	14	5	2	8	45	66
	E	26	47	4	0,466	0,046	3	10	2	1	8	30	43
	Bt	47	88	4	0,372	0,032	3	5	3	1	25	42	51
PV7	A1	0	15	4	2,736	0,176	6	5	2	1	23	94	102
	A2	15	40	4	1,171	0,076	4	2	1	1	15	54	57
	Bt1	40	75	4	1,226	0,077	3	1	1	1	11	39	42
	Bt2	75	150	4	0,451	0,046	3	1	1	0	5	24	27
CH8	A1	0	25	4	3,900	0,268	8	3	1	1	32	140	145
	A2	25	88	4	1,186	0,079	3	1	1	1	26	83	86
	Bi1	88	132	4	0,620	0,038	2	1	1	1	19	42	45
	Bi2	132	200	4	0,617	0,026	3	1	1	1	9	24	27

(1) Hor = Horizonte; (2) PI = Profundidade inicial; (3) PF = Profundidade final; (4) C = Carbono; (5) N = Nitrogênio

Com base nas análises da Tabela 16 determinaram-se para P, K, Ca e Mg, os totais de nutrientes disponíveis, por hectare, até 100 cm de profundidade, considerando as análises e espessuras de cada horizonte, e expressos em kg de nutriente disponível/ha. Para os solos com profundidades inferiores a 100 cm (LI1, CB4 e PA6, Tabela 14), os nutrientes disponíveis foram calculados até suas profundidades efetivas.

O total de nitrogênio (N) até 100 cm de profundidade, em kg N ha⁻¹, foi estimado para cada sítio através da multiplicação dos teores de N dos horizontes (Tabela 16), pelas densidades aparentes e espessuras dos respectivos horizontes (Tabela 15). Deste total, foram considerados como disponíveis às plantas somente 10% do nitrogênio (GONÇALVES; MENDES; SASAKI, 2001), estando os demais em formas pouco ou não disponíveis, já fazendo parte de frações húmicas muito estáveis.

2.2.7 Estoques de nutrientes na floresta

Para estimar o estoque de nutrientes das florestas, foi efetuada uma amostragem intensiva da biomassa e dos nutrientes nela contidos, em cada sítio, para os seguintes compartimentos: acículas, galhos finos, galhos grossos, cones, casca, lenho, raiz pivotante, raízes grossas e médias, serapilheira (separada em lenhosa, pouco decomposta e muito decomposta).

Assim, em cada um dos oito sítios foram abatidas 8 árvores de três diferentes classes diamétricas, com base na medição do inventário, a saber: 4 árvore de DAP médio do povoamento; 2 árvores de DAP médio menos 1 desvio padrão; e 2 de DAP médio mais 1 desvio padrão.

Foram então separados e pesados (Peso Verde Total) os referidos compartimentos. Coletaram-se amostras de material de vegetal de todos os compartimentos (de 500 a 1000 gramas) para determinação do teor de umidade e para análise de material vegetal (somente em metade das árvores de cada classe). Os

materiais foram secos em estufa, a 65°C, até peso constante, possibilitando a determinação da matéria seca por árvore e compartimento. As análises vegetais foram efetuadas no Laboratório de Ecologia Aplicada da ESALQ/USP conforme metodologia do IAC.

A amostragem de serapilheira foi realizada através de quadrado de metal de 0,25 m² (50 cm x 50 cm) sendo obtidas três amostras de serapilheira por local. A serapilheira foi dividida em 3 tipos: serapilheira lenhosa (Cones e Galhos), serapilheira pouco decomposta e serapilheira muito decomposta. Destes compartimentos também foram coletadas amostras para determinação do teor de umidade e para análise química.

As 32 árvores amostradas (8 por sítio) foram utilizadas para se obter as equações (4) de biomassa por compartimento, ou seja: raiz grossa, lenho, casca, galhos, cones e acículas, e tendo-se por variável independente o DAP e a altura das árvores:

$$\ln(B_i) = a + b \cdot \ln(D) + c \cdot \ln(H) \quad (4)$$

Onde:

B_i = Biomassa do compartimento i , em kg;

D = DAP da árvore, em cm;

H = Altura da árvore, em m;

a , b , c = parâmetros a serem estimados pelo modelo.

Com base nestas equações, estimaram-se as biomassas de cada compartimento da floresta, em Mg ha⁻¹, através da soma dos valores de cada árvore, e expandindo-se para hectare com base na área de cada parcela. Para a serapilheira,

estimaram-se os valores de matéria seca, expandindo-se por hectare, com base na área amostral dos três lançamentos do quadrado.

Estas biomassas dos compartimentos das florestas, determinadas para os dados do inventário, foram ajustadas para o ciclo padrão de 25 anos, utilizando-se a razão entre o volume aos 25 anos e o volume no inventário como fator de correção (item 2.2.4). Este ajuste não foi efetuado para os valores de serapilheira, considerando-se que ela já estava em equilíbrio.

Os valores de análise vegetal (N, P, K, Ca e Mg) para cada sítio e compartimento, foram ponderados pela biomassa dos compartimentos das árvores, e os valores médios ponderados foram multiplicados pelas biomassas estimadas para ciclos de 25 anos para obter o estoque de nutrientes nas florestas, por compartimento, para estes ciclos padrões.

2.2.8 Entrada de nutrientes no sistema solo-floresta

2.2.8.1 Via precipitação

As informações consideradas para a determinação das entradas de nutrientes via precipitação foram obtidas a partir dos valores médios dos trabalhos realizados por Oki (2002), Stape (2002), Vital; Lima; Camargo (1999), Arcova et al. (1985), Oliveira (1989) e Câmara; Lima; Vieira (2000), em situações de plantios florestais, próximos à costa atlântica (Tabela 3).

Optou-se pela utilização desta média, face à escassez de dados históricos destes valores, e eliminando-se dados considerados destoantes da faixa típica de inputs sugerida para as condições brasileiras por Poggiani; Schumacher (1997).

2.2.8.2 Via fertilização, fixação biológica de nitrogênio e intemperismo de minerais

No presente estudo não foram consideradas as entradas via fertilização, uma vez que a grande maioria dos plantios florestais de *P.taeda* no Sul do Brasil não é ainda fertilizada. Este é inclusive um dos propósitos do estudo, ou seja, averiguar os riscos de tal prática de manejo.

Devido aos baixos aportes de nitrogênio através da fixação de vida livre (FISHER; BINKLEY, 1999) e pelo manejo florestal sem a presença de subbosque com leguminosas, considerou-se nulo o aporte de nitrogênio por estas vias.

Da mesma forma, a entrada de nutrientes via intemperismo de rocha foi considerada como sendo nula, uma vez que boa parte dos materiais de origem é desprovida de minerais primários (arenito Furnas, formação Itatraré). Apesar de haver potencial de certo aporte via intemperismo nos solos originários de suítes graníticas, e os com horizontes câmbicos, não há informação suficiente para estimar estas taxas.

2.2.9 Saídas de nutrientes no sistema solo-floresta e simulações estudadas

O presente estudo sobre a sustentabilidade nutricional de plantios de *P.taeda* não simulou diferentes entradas de nutrientes do sistema, pois como visto no item 2.2.8 as entradas para estes sistemas florestais, atualmente, são restritas. Além disso, o grande foco do estudo é justamente avaliar quão crítica é esta falta de entradas, notadamente a fertilização, frente às formas mais claras e intensas de saídas de nutrientes, a saber: pela colheita, pelo manejo do resíduo e pela erosão.

Assim, o estudo estabeleceu um sistema fatorial de análise, com a simulação de 3 fatores influentes (colheita, resíduo e erosão), cada um com 2 níveis, detalhados a seguir.

2.2.9.1 Perdas por colheita

Neste estudo, consideraram-se dois tipos de colheita: Lenho e Árvore Inteira. A colheita tipo Lenho, é a mais conservadora, com a remoção apenas do lenho descascado da floresta, simulando, por exemplo, uma colheita com harvester com cabeça descascadora. Neste sistema, apenas o conteúdo nutricional do lenho, aos 25 anos é removido da floresta.

Na colheita tipo Árvore Inteira, a árvore é cortada, arrastada inteira até um picador móvel na borda do talhão, removendo-se, a cada corte da floresta, os nutrientes contidos na casca, lenho, galhos finos, galhos grossos, cones e acículas.

Nos dois tipos de colheita, não são removidas a serapilheira e as raízes.

2.2.9.2 Perdas por manejo dos resíduos

Com relação a queima também foram considerados 2 possíveis cenários: Cultivo Mínimo e Queima. No cenário sem queima de resíduos pós-colheita e pré-preparo, considera-se não haver perda de nutrientes por lixiviação, face a rápida colonização com ervas daninhas e depois o estabelecimento da nova floresta.

No cenário com queima, há perdas de nutrientes contidos nos resíduos existentes pós-colheita e pré-preparo, estimados como sendo na ordem de 84,7% para o Nitrogênio, 48,7% para o Fósforo, 53,0% para o Potássio, 45,7% para o Cálcio e 44,0% para o Magnésio (adaptado de MALUF,1991; WATERLOO, 1994; CERRI et al., 1998, Tabela 2). Optou-se pelo uso da média de perdas percentuais de diversos valores da literatura, face à escassez de informações, e alta variabilidade dos resultados. Além disso, ressalta-se que estes valores representam queimas intensas, ou seja, quando há efetivo consumo dos restos vegetais, incluindo a serapilheira.

2.2.9.3 Perdas por erosão

Para a realização dos balanços consideraram-se dois possíveis cenários com relação às perdas por erosão. Um cenário isento de erosão (0 cm perda de solo por ciclo) e um cenário com erosão (2 cm de perda de solo por erosão por ciclo) no primeiro ano do ciclo da cultura florestal. Este valor de erosão se baseia em recentes estudos de Wichert (2005) em áreas com manejo intensivo do solo.

2.2.10 Balanço Entrada-Saída e Indicador de Sustentabilidade: Número de Ciclos Padrões para Zerar o Estoque de Nutrientes Disponíveis no Sistema

O impacto dos 8 diferentes tipos de manejo (2 tipos de colheita x 2 manejo de resíduos x 2 níveis de erosão) sobre a sustentabilidade dos oito sítios florestais foi avaliada através do uso do conceito de número de ciclos florestais padrões necessários para zerar o estoque de cada nutriente disponível no sistema solo-floresta.

Assim, quanto menor este número, menos sustentável é o manejo para aquele nutriente, pois ele é exaurido mais rapidamente. Em verdade, a exaustão é paulatina, pois a cada ciclo as produtividades se alteram (reduzem), mas neste conceito de ciclos, considera-se que as produtividades, e os respectivos níveis de remoção de nutrientes, se mantenham, de forma que expressem um valor de sustentabilidade.

Mesmo que estes números de ciclos não tenham significado real em termos absolutos, eles tem grande significado relativo para comparar diferentes manejos atuando sobre um mesmo sistema.

Neste estudo, para cada nutriente (N, P, K, Ca e Mg) e cada sítio, estimou-se a entrada do nutriente em 25 anos, via chuva (Entrada Nutriente/ciclo, em kg/ha/ciclo), e as saídas conforme as 8 combinações de manejo, também a cada 25 anos (Saída de Nutriente/ciclo, em kg/ha/ciclo). Esta saída representa a soma das perdas por colheita, manejo de resíduo e erosão. Posteriormente, estimou-se o total do nutriente no sistema

solo (até 100 cm de profundidade, ou menos, *Estoque Nutirente Solo*, em kg/ha) e floresta (todos os compartimentos, *Estoque Nutriente Floresta*, em kg/ha).

Assim, o número de ciclos (NC) para zerar o estoque de cada nutriente, em cada sítio, pode ser calculado por (5):

$$NC = \frac{\textit{EstoqueNutrienteSolo} + \textit{EstoqueNutrienteFloresta}}{\textit{SaídaNutriente} / \textit{ciclo} - \textit{EntradaNutriente} / \textit{ciclo}} \quad (5)$$

Onde:

NC = número de ciclos, de 25 anos, para zerar o estoque de um nutriente (N, P, K, Ca ou Mg) em um sítio (LI1, PV2, CL3, CB4, LE5, PA6, PV7 ou CH8);

EstoqueNutrienteSolo = em kg/ha do nutriente até 100 cm de profundidade;

EstoqueNutrienteFloresta = em kg/ha do nutriente contido na serapilheira, raiz, casca, lenho, galho fino, galho grosso, cones, acículas;

EntradaNutriente/ciclo = kg/ha/ciclo do nutriente que entra via chuva;

SaídaNutriente/ciclo = kg/ha/ciclo de nutriente que saí via colheita (lenho ou árvore inteira), manejo resíduo (cultivo mínimo ou queima) e erosão (0 ou 2 cm).

Nota-se que os valores de NC serão maior do que zero, se a entrada de nutrientes por ciclo for maior do que a saída, e este valor mostra justamente o grau de sustentabilidade daquela combinação de manejos, para aquele nutriente, naquele sítio. Por outro lado, os valores de NC serão negativos, se a entrada for maior do que a saída, mostrando que o balanço é positivo, ou seja, há mais aporte do que perdas de nutrientes para aquela combinação de manejos, para aquele nutriente e para aquele ciclo. Neste caso, não se interpreta a magnitude do valor, bastando saber que o sistema é sustentável, e o número de ciclos é representado por um valor "+", significando infinitos ciclos.

A implementação de todos estes cenários e simulações só foi possível pela utilização de um programa de computador escrito em Visual Basic para Aplicação (VBA).

2.3 Resultados e discussão

2.3.1 Produção volumétrica

Na tabela 17 são apresentados os resultados dendrométricos das parcelas amostrais instaladas próximas às trincheiras de solo nos oito sítios do estudo. Observa-se a alta variabilidade volumétrica existente entre os sítios estudados, devido a terem sido manejados por diferentes métodos, ou seja, sem e com desbastes, e por terem idades distintas (19 a 29 anos). De qualquer forma, nota-se pelos índices de sítio, que variam de 18 a 28 m, que a seleção dos locais foi eficaz para capturar distintas capacidades produtivas para o *P.taeda* na região.

Tabela 17 - Resultados dendrométricos do inventário efetuado nas florestas dos oito sítios estudados, em termos de densidade (N), Dap médio (DAP), Altura média (Altura), Índice de Sítio (IS), Área Basal (AB) e Volume total com casca (Volume)

Sítio Sigla	Idade Anos	N Árvores ha ⁻¹	DAP cm	Altura m	IS m	AB m ² ha ⁻¹	Volume m ³ ha ⁻¹
LI1	28	288	28,3	17,4	18,6	18,0	125,3
PV2	25	1300	22,4	19,6	21,5	51,1	416,6
CL3	29	375	34,3	22,6	22,7	34,7	321,8
CB4	25	900	26,9	24,3	24,9	26,9	529,5
LE5	19	450	31,7	22,9	25,9	35,5	346,0
PA6	25	850	27,6	25,1	25,1	51,0	555,9
PV7	27	163	44,6	26,3	28,0	25,4	307,8
CH8	25	125	48,5	28,6	28,8	23,1	267,5

Como os povoamentos estudados encontravam-se com idades e manejos distintos, houve a necessidade de uma padronização do volume total produzido num ciclo padrão de 25 anos, que é apresentado na Tabela 18.

Tabela 18 – Estimativas do volumes de madeira removidos nos desbastes, e os medidos no inventário final, para obter o volume total produzido em cada sítio (Vol. Total) e o respectivo Incremento Médio Anual (IMA). A última coluna (Vol. 25) representa o volume estimado para uma rotação padrão de 25 anos em todos os sítios. Observe que a numeração dos sítios é crescente com o IMA

Sítio Sigla	Idade Anos	Intervenção Tipo	Volume m^3ha^{-1}	Vol. Total m^3ha^{-1}	IMA $m^3ha^{-1}ano^{-1}$	Vol. 25 m^3ha^{-1}
LI1	10	1º desbaste	70,0			
	21	2º desbaste	140,0			
	28	Inventário	125,3	335,3	11,20	299,4
PV2	25	Corte raso	416,6	416,6	16,66	416,6
CL3	10	1º desbaste	70,0			
	21	2º desbaste	140,0			
	29	Inventário	321,8	531,8	18,34	458,4
CB4	25	Inventário	529,5	529,5	21,18	529,5
LE5	8	1º desbaste	65,0			
	19	Inventário	346,0	411,0	21,63	540,8
PA6	25	Inventário	555,9	555,9	22,24	555,9
PV7	8	1º desbaste	80,0			
	19	2º desbaste	230,0			
	27	Inventário	307,8	617,8	22,88	572,0
CH8	8	1º desbaste	80,0			
	13	2º desbaste	120,0			
	19	3º desbaste	200,0			
	25	Inventário	267,6	667,6	26,70	667,6

Pela Tabela 18, observa-se que os diferentes sítios, com diferentes tipos de solos, realmente possuíam diferentes produtividades. Assim, o sítio menos produtivo, por exemplo, apresentou um incremento médio anual (IMA) de apenas $11,2 m^3ha^{-1}ano^{-1}$, enquanto o mais produtivo lhe foi 138% superior, atingindo $26,7 m^3ha^{-1}$. Estes valores cobrem adequadamente a diversidade de produtividade do *P.taeda* na região, embora em áreas mais aptas de Santa Catarina, o *P.taeda* produza valores superiores a $30 m^3 ha^{-1} ano^{-1}$. Reissmann; Wisnewski (2000) também apresentaram resultados de diferentes povoamentos florestais, sob diferentes tipos de solos e produtividades volumétricas diferenciadas para Pinus.

É também possível notar, que há forte relação entre o Incremento Médio Anual (IMA) e o Índice de Sítio (IS) ($r^2 = 0,950$), como mostra a Figura 3. Isto sugere, que uma

vez ajustada a densidade de árvores, ou seja, padronizado o ciclo de 25 anos, a produtividade pode ser expressa tanto em termos de IMA, ao final do ciclo, quanto em termos de IS.

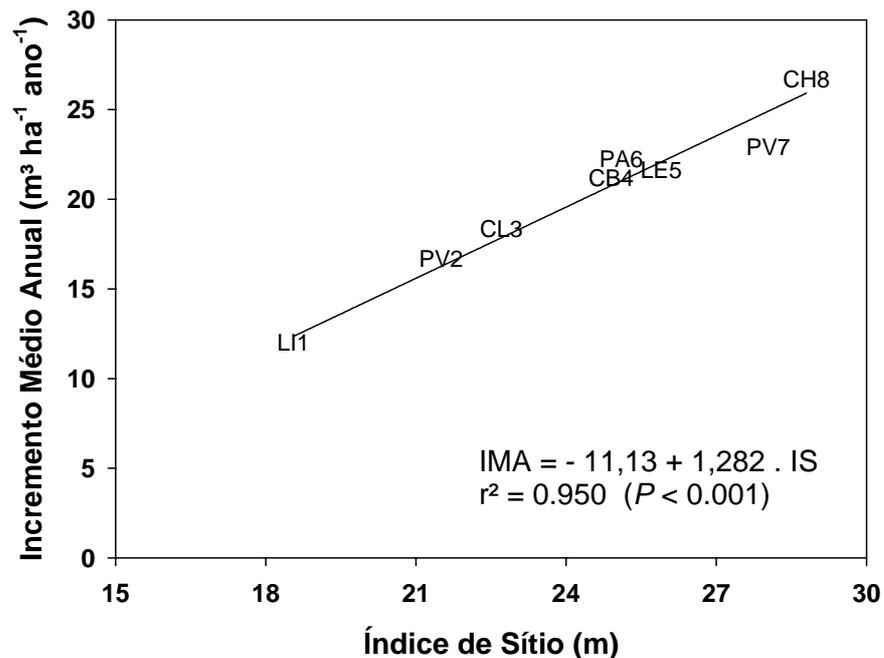


Figura 3 – Relação entre o Incremento Médio Anual (IMA) e o Índice de Sítio (IS) do *P.taeda*, para idade base de 25 anos, para os 8 sítios do estudo

2.3.2 Equações de biomassas

Na tabela 19 estão as estimativas dos coeficientes das equações de biomassa obtidos para os sete compartimentos da floresta. Estas equações têm alta aplicabilidade, além deste estudo, pois trabalhou com 32 árvores, de diferentes classes de tamanho e oriundas de sítios muito distintos, notadamente para compartimentos de difícil mensuração, como raiz. Schumacher; Caldeira (2001) trabalharam na construção de uma equação de biomassa para *E. globulus* através da amostragem de nove árvores em diferentes classes diamétricas e obtiveram um coeficiente de correlação aceitável, R^2 entre 0,86 a 0,97.

Tabela 19 – Coeficientes a, b e c das equações de biomassa, em kg, com base no DAP (em cm) e altura da árvore (em metros), na forma $B = a.DAP^b.H^c$, e estimados para cada compartimento de *P. taeda*. Em todos os casos, há 32 observações, e os coeficientes da regressão foram significativos ($P < 0.01$)

Compartimentos	Coeficientes de Regressão			R ²
	a	b	C	
Lenho	-2,813625	2,112657	0,438095	0,91
Casca	-4,320976	1,846731	0,449540	0,92
Galho Grosso	-5,585568	3,714195	-1,224607	0,84
Galho Fino	-3,382008	2,787447	-1,004186	0,81
Acícula	-3,177202	3,188271	-1,636935	0,80
Cone	-0,412202	5,591900	-5,549782	0,61
Raiz Grossa	-1,605436	2,339874	-0,576613	0,80

2.3.3 Produção de biomassa

Através das equações da Tabela 19, foram determinadas as biomassas de cada compartimento e sítio observadas na época do inventário (Tabela 20).

Tabela 20 – Estimativas dos volumes de madeira, e das biomassas por compartimento, dos oito sítios florestais com base no inventário e equações de biomassa

Sítio	Volume (m ³ ha ⁻¹)	Lenho	Casca	Galho		Acícula	Cone	Raiz
				Grosso	Fino			
		Mg ha ⁻¹						
LI1	125,3	71,2	6,6	8,3	6,1	4,7	3,2	27,5
PV2	416,6	207,3	20,4	15,1	13,4	8,9	2,6	68,5
CL3	321,8	155,2	13,9	16,1	10,7	7,6	3,1	48,9
CB4	529,5	230,8	21,8	15,5	12,5	7,8	1,6	64,6
LE5	346,0	159,3	14,5	14,2	10,1	6,8	2,1	48,2
PA6	555,9	235,7	22,0	16,5	12,4	7,7	1,6	63,8
PV7	307,8	132,8	11,0	13,4	7,3	4,8	1,3	33,5
CH8	267,6	119,0	9,7	14,8	7,4	5,2	2,0	32,1

Estes resultados mostram que da biomassa total das florestas, excetuando-se as raízes finas, o lenho é o compartimento com maior participação na biomassa, com 62%, seguido das raízes, com 18%, galhos com 10%, casca com 6%, acículas com 3% e cones com 1%. Nota-se também, que percentualmente, a participação das raízes se

reduz dos sítios menos produtivos (22%) para os mais produtivos (16%), sugerindo que as árvores investem menos em raízes quando há maior qualidade de sítio (nutriente e água). Esta mesma tendência foi observada por Stape; Binkley; Ryan (2004), para *Eucalyptus* e por Schubert (1991) para *Pinus*,

Da mesma forma como foi realizado o ajuste do inventário florestal para uma rotação padrão de 25 anos, determinaram-se também as biomassas estimadas por compartimento e por sítio aos 25 anos, as quais podem ser vistas na Tabela 21.

Tabela 21 – Estimativas dos volumes de madeira, e das biomassas por compartimento, dos oito sítios florestais, padronizados para uma rotação de 25 anos

Sítio Sigla	Vol25 m ³ ha ⁻¹	Lenho	Casca	Galho		Acícula	Cone	Raiz Total
				Grosso	Fino			
		Mg ha ⁻¹						
LI1	299,4	170,0	15,9	19,8	14,7	11,2	7,6	65,7
PV2	416,6	207,3	20,4	15,1	13,4	8,9	2,6	68,5
CL3	458,4	221,1	19,8	22,9	15,2	10,8	4,4	69,7
CB4	529,5	230,8	21,8	15,5	12,5	7,8	1,6	64,6
LE5	540,8	249,0	22,6	22,2	15,8	10,7	3,3	75,3
PA6	555,9	235,7	22,0	16,5	12,4	7,7	1,6	63,8
PV7	572,0	246,9	20,5	24,9	13,6	9,0	2,3	62,3
CH8	667,6	297,0	24,2	36,8	18,5	13,0	5,1	80,0

Por estes valores, nota-se que os incrementos médios anuais, expressos em biomassa, foram para o tronco (lenho mais casca), de 7,4 a 12,8 Mg ha⁻¹ ano⁻¹, resultando numa densidade média da madeira, com casca, de 0,51 g/cm³. Interessantemente, os sítios menos produtivos são os com maiores densidades (acima de 0,52 g/cm³), enquanto os mais produtivos possuem densidades inferiores a 0,48 g/cm³. Slooten et al (1976) observaram comportamento similar ao comparar a densidade do *Pinus elliottii* nas regiões sul e sudeste do Brasil, em diferentes situações edafo-climáticas.

2.3.4 Estoque de nutrientes da floresta

Com base na Tabela 21, e nas quantidades de serapilheira por hectare, e nos teores médios ponderados de concentração dos nutrientes em cada compartimento da floresta, em cada sítio (Tabela A1, no anexo), estimaram-se os estoques de nutrientes nas florestas ao final de uma rotação padrão de 25 anos. Tais valores encontram-se na Tabela 22.

Tabela 22 – Estimativas dos estoques de nutrientes nos compartimentos da floresta, em cada sítio, ao final de uma rotação padrão de 25 anos para *P.taeda*

Solo	Compartimento	Biomassa Mg ha ⁻¹	N	P	K Kg ha ⁻¹	Ca	Mg
LI1	Lenho	170,0	201,1	15,0	43,7	70,9	18,2
	Casca	15,9	47,3	5,2	10,8	8,5	3,1
	Galho Grosso	19,8	38,3	3,3	4,0	10,9	3,3
	Galho Fino	14,7	58,3	5,3	7,6	12,5	3,9
	Acícula	11,2	169,2	12,5	19,2	21,9	4,4
	Cones	7,6	...	...	...	...	...
	Raiz Total	65,7	340,6	20,9	68,9	90,4	18,9
	Serap. Pouco Decomposta	5,0	40,4	1,6	1,9	13,0	1,9
	Serap. Lenhosa	3,1	26,9	1,6	0,9	7,9	0,8
	Serap. Muito Decomposta	17,0	219,3	12,3	5,1	6,2	1,9
PV2	Lenho	207,3	215,3	8,1	51,2	84,7	23,4
	Casca	20,4	93,5	5,9	22,7	50,3	15,6
	Galho Grosso	15,1	21,8	1,9	9,1	11,5	3,7
	Galho Fino	13,4	47,5	4,1	12,0	15,5	7,6
	Acícula	8,9	134,8	8,8	40,3	14,9	6,9
	Cones	2,6	...	...	...	...	...
	Raiz Total	68,5	182,0	13,2	87,8	120,9	34,6
	Serap. Pouco Decomposta	5,5	53,7	3,1	14,7	20,9	7,2
	Serap. Lenhosa	3,2	28,9	1,7	4,5	17,4	5,1
	Serap. Muito Decomposta	14,6	184,9	9,5	17,5	150,2	25,0
CL3	Lenho	221,1	221,4	18,5	103,1	87,0	66,8
	Casca	19,7	57,8	4,1	10,8	11,2	9,6
	Galho Grosso	22,9	39,2	3,2	14,7	18,0	12,7
	Galho Fino	15,2	41,0	2,9	11,0	12,0	10,2
	Acícula	10,8	175,6	13,5	36,6	9,2	11,5
	Cones	4,4	14,8	0,9	5,1	2,1	2,3
	Raiz Total	69,7	293,2	14,4	80,5	61,1	58,0
	Serap. Pouco Decomposta	9,1	77,9	6,2	8,6	20,3	6,2
	Serap. Lenhosa	3,4	25,9	1,1	2,0	5,4	3,0
	Serap. Muito Decomposta	78,1	938,4	51,6	31,2	46,9	15,6
CB4	Lenho	230,7	256,1	9,6	85,4	164,1	49,9
	Casca	21,8	76,4	4,7	19,9	64,1	15,1
	Galho Grosso	15,5	20,7	1,7	7,5	14,4	4,0
	Galho Fino	12,5	42,7	3,7	15,0	32,3	8,5
	Acícula	7,8	115,8	7,3	31,6	32,2	8,6

Tabela 22 – Estimativas dos estoques de nutrientes nos compartimentos da floresta, em cada sítio, ao final de uma rotação padrão de 25 anos para *P.taeda*

Solo	Compartimento	Biomassa Mg ha ⁻¹	(continuação)				
			N	P	K Kg ha ⁻¹	Ca	Mg
	Cones	1,6	...	...	...	...	...
	Raiz Total	64,6	215,2	11,3	131,0	186,7	65,8
	Serap. Pouco Decomposta	9,6	87,5	4,5	22,4	39,2	11,3
	Serap.Lenhosa	2,0	17,0	1,1	2,4	10,3	2,4
	Serap. Muito Decomposta	8,7	116,0	8,0	13,1	69,6	11,8
LE5	Lenho	249,0	283,9	10,2	77,6	52,4	28,6
	Casca	22,6	71,9	8,2	28,5	20,2	15,3
	Galho Grosso	22,2	37,8	2,7	17,4	15,2	10,9
	Galho Fino	15,8	48,5	4,9	23,3	19,4	15,5
	Acícula	10,7	156,5	10,9	33,6	17,5	6,4
	Cones	3,3	11,9	1,3	4,5	1,8	1,6
	Raiz Total	75,3	307,2	13,5	99,0	79,4	65,6
	Serap. Pouco Decomposta	9,5	73,8	5,3	10,5	33,6	7,7
	Serap.Lenhosa	3,3	24,7	1,2	1,8	8,7	3,6
	Serap. Muito Decomposta	31,5	385,6	25,5	18,9	41,0	12,6
PA6	Lenho	235,7	300,4	14,3	64,5	94,1	26,5
	Casca	22,0	63,2	5,1	15,7	44,6	10,3
	Galho Grosso	16,5	26,2	1,7	4,0	16,5	4,3
	Galho Fino	12,4	48,2	3,4	8,1	23,2	6,5
	Acícula	7,7	103,6	6,8	25,3	21,6	5,9
	Cones	1,6	...	...	...	...	...
	Raiz Total	63,8	305,6	14,1	92,0	117,1	38,4
	Serap. Pouco Decomposta	7,5	73,8	5,3	10,5	33,6	7,7
	Serap.Lenhosa	4,0	24,7	1,2	1,8	8,7	3,6
	Serap. Muito Decomposta	48,7	385,6	25,5	18,9	41,0	12,6
PV7	Lenho	246,9	233,6	24,7	94,8	148,9	45,1
	Casca	20,5	50,8	4,0	22,9	32,8	12,9
	Galho Grosso	24,9	26,6	2,5	13,6	28,9	7,5
	Galho Fino	13,6	36,4	3,0	16,0	24,4	8,4
	Acícula	9,0	111,0	8,4	32,4	24,1	7,6
	Cones	2,3	...	...	...	...	...
	Raiz Total	62,3	173,4	12,2	121,5	118,9	43,2
	Serap. Pouco Decomposta	11,0	68,4	3,7	19,9	40,9	8,6
	Serap.Lenhosa	3,2	25,3	1,2	1,9	12,9	2,1
	Serap. Muito Decomposta	14,2	167,7	6,2	12,8	32,2	7,5
CH8	Lenho	297,0	305,2	27,0	151,5	210,7	43,8
	Casca	24,2	65,7	6,3	22,1	20,1	5,4
	Galho Grosso	36,8	60,1	7,7	25,8	34,9	9,3
	Galho Fino	18,5	58,2	6,2	22,2	35,4	7,7
	Acícula	13,0	180,3	13,7	54,8	31,2	6,9
	Cones	5,1	...	...	...	...	...
	Raiz Total	80,0	312,1	25,5	140,8	151,6	35,5

Tabela 22 – Estimativas dos estoques de nutrientes nos compartimentos da floresta, em cada sítio, ao final de uma rotação padrão de 25 anos para *P.taeda*

Solo	Compartimento	Biomassa Mg ha ⁻¹	(conclusão)				
			N	P	K	Ca	Mg
			Kg ha ⁻¹				
	Serap. Pouco Decomposta	11,8	108,3	7,7	20,0	33,0	6,4
	Serap. Lenhosa	3,2	36,7	2,2	1,9	13,9	2,1
	Serap. Muito Decomposta	15,1	202,2	12,8	15,1	46,8	9,0

Nota: Sinal convencional utilizado:

... Dado numérico não disponível

Estes valores mostram claramente que a distribuição de nutrientes na floresta não é proporcional à biomassa do compartimento, pois eles possuem teores de nutrientes muito distintos. Assim, para o conteúdo total de nitrogênio na árvore, 32% está nas raízes, 31% no lenho, 18% nas acículas, 10% nos galhos, 8% na casca, e praticamente 0% nos cones, o que contrasta com a distribuição de biomassa. Por exemplo, enquanto o lenho possui 62% da biomassa, tem apenas 31% do nitrogênio, e as acículas com apenas 3% da biomassa, contém 18% do nitrogênio. Valeri (1988), trabalhando com *P.taeda* na região de Telêmaco Borba-PR observou distribuição de nutrientes similar a estas apresentadas na tabela 22.

2.3.5 Estoque de nutrientes disponíveis no solo

Na Tabela 23 são apresentados os estoques dos nutrientes N, P, K, Ca e Mg disponíveis no solo, nas profundidades de 0 a 20 cm, 20 a 40 cm, 40 a 100 cm e o total de 0 a 100 cm, para os oito sítios estudados.

Tabela 23 - Estimativas dos estoques de nutrientes disponíveis no solo, em cada sítio, nas camadas de 0 a 20 cm, 20 a 40 cm e 40 a 100 cm. Os sítios LI1, CB4 e PA6 possuem profundidades de 30, 42 e 88 cm, respectivamente

Sítio Sigla	Camada cm	N	P	K	Ca	Mg
LI1	0-20	78,6	6,0	39,0	40,0	24,0
	20-30	39,3	3,0	19,5	20,0	12,0
	Total	117,9	9,0	58,5	60,0	36,0
PV2	0-20	347,4	12,0	78,0	824,0	144,0
	20-40	151,9	9,2	78,0	640,0	110,4
	40-100	279,5	12,0	234,0	360,0	144,0
	Total	778,8	33,2	390,0	1824,0	398,4
CL3	0-20	167,6	6,0	78,0	40,0	24,0
	20-40	146,6	4,6	78,0	40,0	24,0
	40-100	298,5	8,8	124,8	120,0	72,0
	Total	612,6	19,4	280,8	200,0	120,0
CB4	0-20	448,4	10,5	370,5	2230,0	414,0
	20-40	361,1	6,0	312,0	280,0	144,0
	40-42	36,1	0,6	31,2	28,0	14,4
	Total	845,6	17,1	713,7	2538,0	572,4
LE5	0-20	216,9	7,7	78,0	74,0	24,0
	20-40	150,5	6,0	78,0	40,0	24,0
	40-100	210,6	12,0	187,2	120,0	72,0
	Total	578,1	25,7	343,2	234,0	120,0
PA6	0-20	261,4	8,0	156,0	560,0	120,0
	20-40	169,9	6,6	101,4	448,0	69,6
	40-88	234,1	14,4	187,2	550,0	164,4
	Total	665,3	29,0	444,6	1558,0	354,0
PV7	0-20	313,8	11,0	78,0	170,0	42,0
	20-40	188,5	8,0	78,0	80,0	24,0
	40-100	471,0	18,0	234,0	120,0	72,0
	Total	973,2	37,0	390,0	370,0	138,0
CH8	0-20	482,4	16,0	78,0	120,0	24,0
	20-40	239,1	8,5	78,0	60,0	24,0
	40-100	413,3	16,8	234,0	120,0	72,0
	Total	1134,8	41,3	390,0	300,0	120,0

Os valores da Tabela 23 mostram claramente que os solos possuem baixa fertilidade, com baixos estoques de nutrientes solúveis, até 100 cm de profundidade, sendo em média de 713 kg N/ha, 26 kg P/ha, 376 kg K/ha, 886 kg Ca/ha e 232 kg Mg/ha. Fisher; Binkley (2000) comentam sobre a ocorrência destes padrões de fertilidade para solos em regiões tropicais.

Além disso, os teores variam muito entre os sítios, podendo ser de 10 vezes mais, para o N, 5 vezes para o P, 12 vezes para o K, 42 vezes para o Ca e 16 vezes para o Mg. Espera-se assim, que o grau de restrição nutricional entre os sítios sejam portanto muito variáveis, e já inferindo que um futuro manejo nutricional deve ser sítio-específico.

2.3.6 Produtividade e o meio físico

Um dos objetivos do estudo é investigar as possíveis relações existentes entre a produtividade (IMA ou IS) do *P.taeda* e alguns atributos físicos do meio, como precipitação, temperatura, profundidade do solo e estoques de nutrientes disponíveis no solo.

A análise de regressão linear mostrou não haver correlação entre o IMA e as temperaturas mínimas, médias e máximas de cada sítio, como também da precipitação média.

Houve apenas um efeito marginal e positivo da profundidade do solo (IMA = $15,5 + 0,034 \cdot \text{Profundidade}$, $r^2 = 0,30$). No entanto, observou-se uma significativa e positiva correlação entre o IMA, ou o Índice de Sítio, e o estoque de nitrogênio mineralizável até 100 cm de profundidade no perfil do solo, como mostrados nas Figuras 4 e 5.

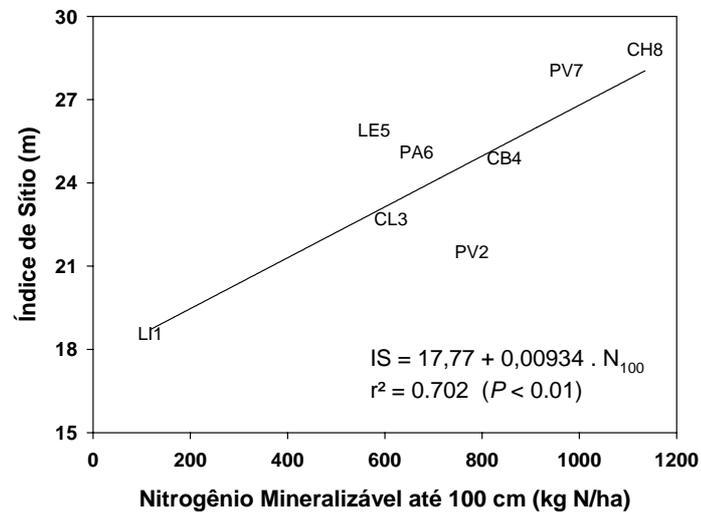


Figura 4 – Relação entre o Índice de Sítio do *P.taeda* para Idade Base de 25 anos (IS) e o conteúdo de nitrogênio mineralizável até 100 cm de profundidade (N_{100}) para os 8 sítios do estudo

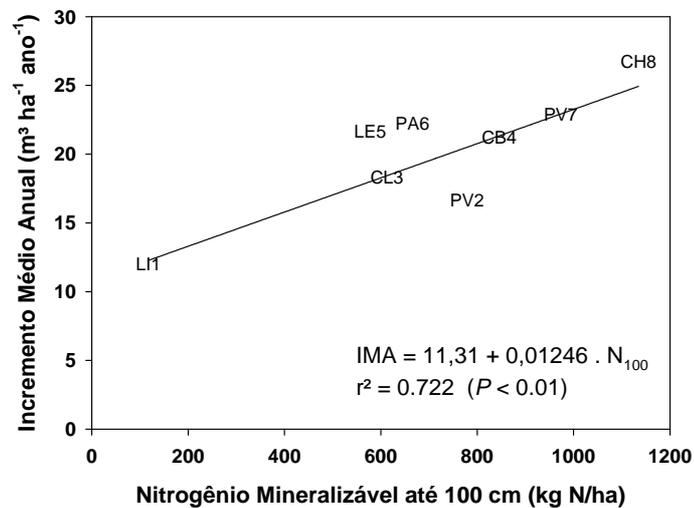


Figura 5 – Relação entre o Incremento Médio Anual do *P.taeda* (IMA) e o conteúdo de nitrogênio mineralizável até 100 cm de profundidade (N_{100}) para os 8 sítios do estudo

Esta relação entre produtividade e teor de nitrogênio disponível no solo, já foi observado por outros autores, e é parte integrante de alguns modelos que detalham o crescimento da floresta em termos dos processos do solo (Battaglia et al. 2004).

Esta relação também existe, porém, mais tênue, entre o IMA e o fósforo ($r^2 = 0,551$, $P = 0.03$), como visto na Figura 6.

Para os demais nutrientes, K, Ca e Mg, nenhuma correlação significativa foi evidenciada, de forma que estas relações observadas para o nitrogênio e para o fósforo podem ser indícios de que a disponibilidade destes nutrientes é a mais determinante na produtividade do *P. taeda* na região. O nitrogênio juntamente com o fósforo também foram os nutrientes mais limitantes em experimento realizado através da omissão de nutrientes (Reissmann; Zöttl, 1987; Laso Garicoits, 1990).

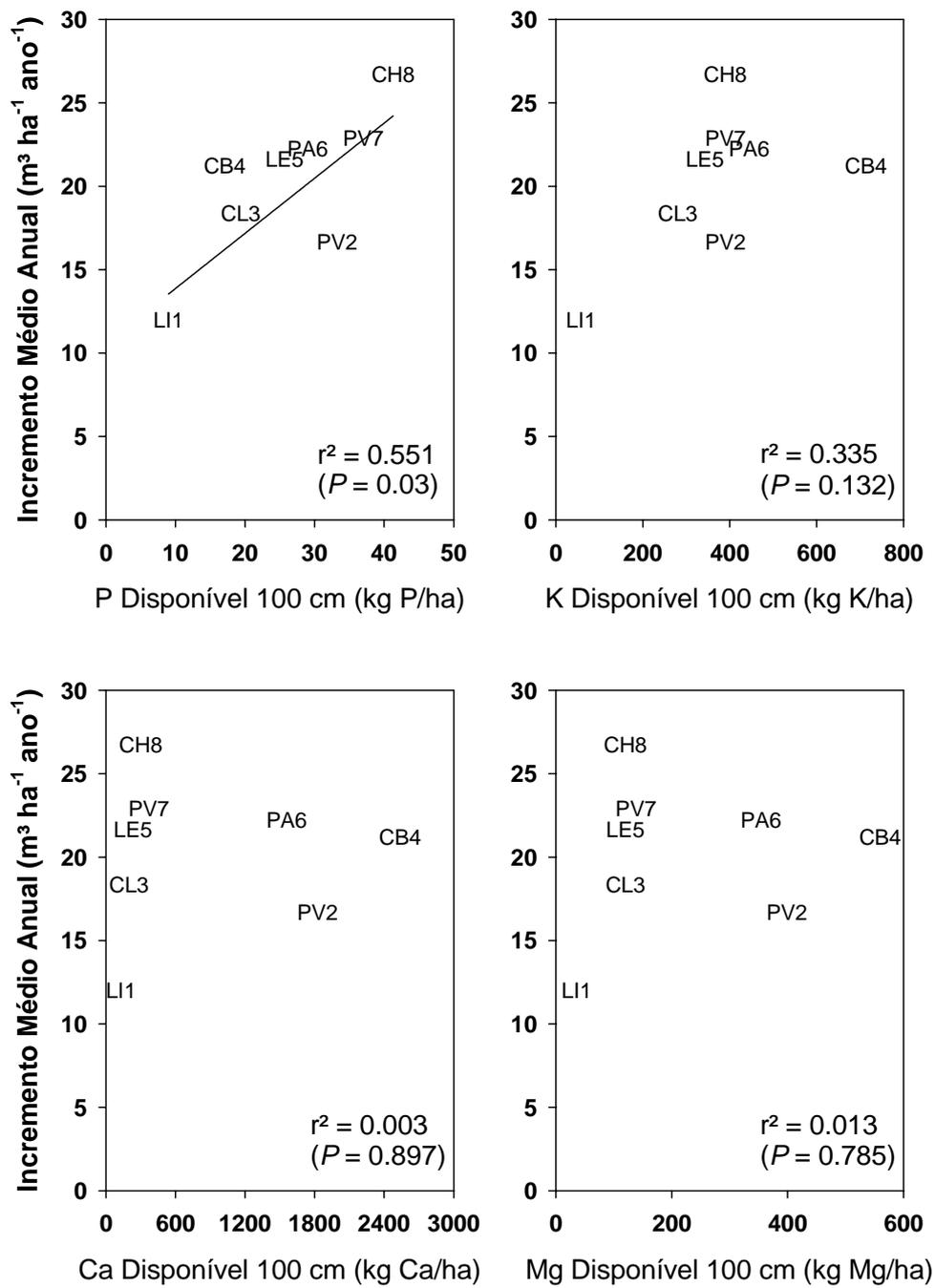


Figura 6 – Relação entre o Incremento Médio Anual e as disponibilidades de P, K, Ca e Mg no solo, até 100 cm de profundidade, para os 8 sítios do estudo

2.3.7 Balanços nutricionais

A Figura 7 ilustra a compartimentalização dos estoques de nitrogênio no sistema solo-floresta, nos oito sítios estudados. Perceba-se que a parte aérea contém uma significativa quantidade dos nutrientes do sistema, no caso, um valor médio de 50%, mas com percentagens que variam de 35 a 72% entre os sítios. Abstrai-se portanto que novamente, o nitrogênio se mostra como um nutriente vulnerável ao manejo (parte aérea) do sistema.

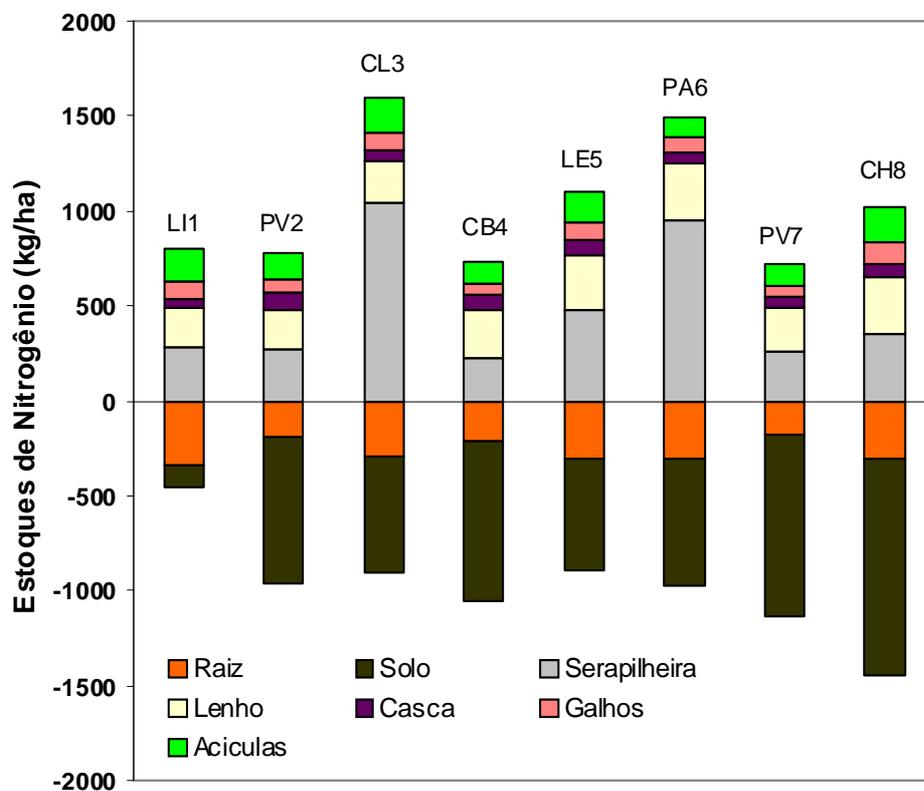


Figura 7 – Estoques de nitrogênio mineralizável no solo até 100 cm, e nos compartimentos das florestas de *P.taeda* ajustadas para 25 anos, nos 8 sítios do estudo

A Tabela 24 relaciona a estimativa do número de ciclos de 25 anos, de *P.taeda*, necessários para remover todo o estoque de nutrientes disponíveis no solo (até 100 cm), na serapilheira e em todos compartimentos da floresta, ou seja, no ecossistema, para cada uma das 8 combinações de manejo simuladas, a saber: 2 sistemas de colheita, 2 manejos de resíduos e 2 níveis de erosão.

Nota-se na Tabela 24, que para o nitrogênio, seja qual for o sistema adotado, nunca há um balanço positivo, ou seja, as entradas via chuva não se mostram suficientes para compensar as colheitas e manejos, mesmo nos sistemas menos impactantes.

Tabela 24 – Estimativa do número de ciclos necessários para zerar o conteúdo de **Nitrogênio (N)** do sistema (nitrogênio mineralizável no solo de 0 a 100 cm, serapilheira e na floresta) de 8 sítios de *P.taeda* de diferentes produtividades, de acordo com o manejo de resíduos, tipo de colheita e grau de erosão a cada ciclo de 25 anos, considerando as produtividades e remoções de nutrientes atuais

Resíduo	Sem Queima				Com Queima				
	Lenho		Inteira		Lenho		Inteira		
	Erosão	0 cm	2 cm	0 cm	2 cm	0 cm	2 cm	0 cm	2 cm
Sítio									
LI1		32,6	27,1	3,6	3,5	2,3	2,3	2,1	2,1
PV2		33,0	19,9	5,0	4,5	3,3	3,1	3,0	2,8
CL3		42,4	33,0	6,4	6,2	2,0	2,0	2,0	1,9
CB4		19,2	12,9	5,1	4,5	3,6	3,3	3,3	3,1
LE5		16,3	13,8	4,4	4,2	2,5	2,4	2,3	2,3
PA6		17,9	15,0	6,5	6,1	2,1	2,1	2,1	2,0
PV7		26,2	18,2	6,3	5,7	3,9	3,6	3,6	3,4
CH8		17,3	12,9	4,9	4,4	3,3	3,1	3,1	2,9
Balanço +	0	0	0	0	0	0	0	0	0
N.Ciclos	25,6	19,1	5,3	4,9	2,9	2,7	2,7	2,6	2,6
s(x)	3,4	2,6	0,4	0,4	0,3	0,2	0,2	0,2	0,2

Observa-se, porém que existe uma grande diferença entre os oito possíveis cenários com relação ao número de ciclos necessários para zerar os estoques de N. No sistema mais conservacionista (sistema de colheita de toras descadas, com cultivo mínimo e sem erosão) pode-se observar que o sistema se sustenta por 25,6 ciclos, enquanto no sistema menos conservacionista (sistema de colheita de árvores inteiras, com uso da queima e erosão de 2 cm a cada ciclo) a sustentabilidade do sistema cai para apenas 2,6 ciclos. Laclau (1999) e Golçalves et al. (2002) verificaram perdas significativas de sustentabilidade com a adoção de sistemas de manejo florestal menos conservacionistas. Reissmann (1981) apud Reissmann;Wisnewski (2000), e Quinteros

Doldan (1987) observaram em experimentos que o nitrogênio também se apresentava como limitante ao desenvolvimento do Pinus.

Para o sistema de colheita de árvore inteira, cultivo mínimo e sem erosão, a sustentabilidade é de 5,3 ciclos, mostrando a premência dos resíduos florestais ficarem na floresta, e não serem removidos pela colheita. Mas é indiscutivelmente a queima, a prática que mais compromete a sustentabilidade do sistema.

A Figura 8 expõe os estoques de fósforo no sistema solo-floresta. A maior parte do fósforo do sistema está na parte aérea, em média 60%, com variação de 44 a 76% entre sítios. Assim, como o nitrogênio, é altamente susceptível ao manejo (parte aérea) do sistema.

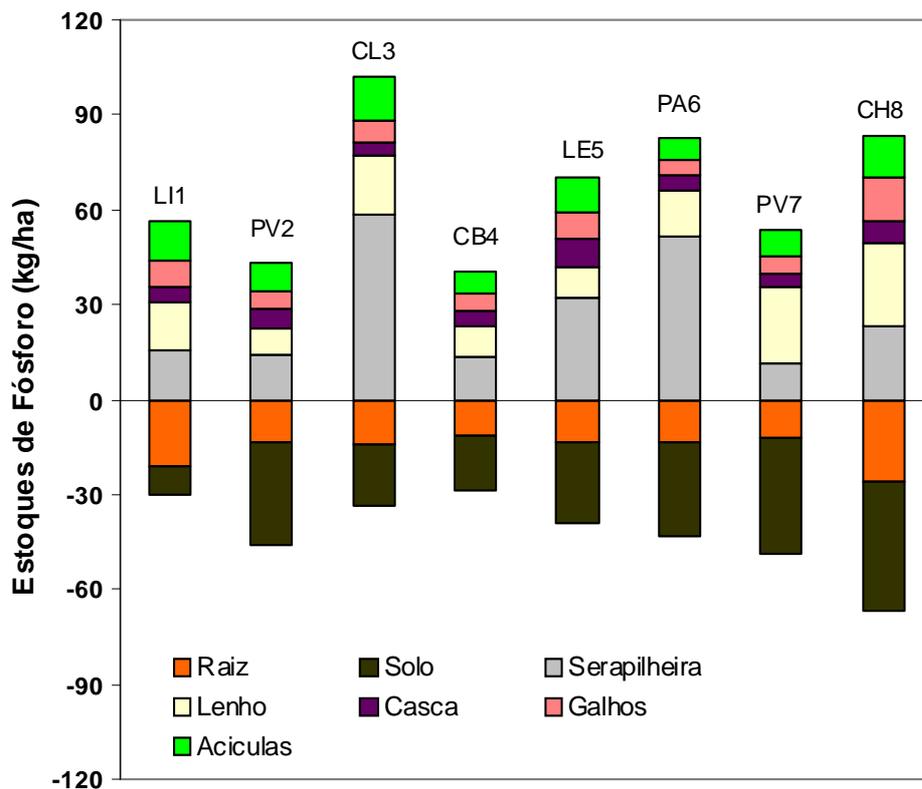


Figura 8 – Estoques de fósforo (P) disponível no solo até 100 cm, e nos compartimentos das florestas de *P. taeda* ajustadas para 25 anos, nos 8 sítios do estudo

No caso do fósforo, quando analisados o número de ciclos necessários para zerar os estoques do sistema (Tabela 25), é possível observar que para o sistema mais conservacionista há 3 sítios com balanço positivo, enquanto que para o sistema menos conservacionista não há balanço positivo. Afora isto, os padrões de redução da sustentabilidade com a colheita de árvore inteira, com a queima e com a erosão, seguem os padrões do nitrogênio, provavelmente a serem semelhantes em sua localização na biomassa aérea do sistema.

Tabela 25 – Estimativa do número de ciclos necessários para zerar o conteúdo de **Fósforo (P)** do sistema (P solúvel no solo de 0 a 100 cm, serapilheira e na floresta) de 8 sítios de *P.taeda* de diferentes produtividades, de acordo com o manejo de resíduos, tipo de colheita e grau de erosão a cada ciclo de 25 anos, considerando as produtividades e remoções de nutrientes atuais

Resíduo	Sem Queima				Com Queima			
	Lenho		Inteira		Lenho		Inteira	
Erosão	0 cm	2 cm	0 cm	2 cm	0 cm	2 cm	0 cm	2 cm
Sítio								
LI1	17,2	15,4	2,8	2,7	3,4	3,3	2,2	2,2
PV2	+	+	4,8	4,5	5,9	5,5	3,5	3,3
CL3	16,1	15,0	4,1	4,0	2,8	2,7	2,2	2,2
CB4	+	111,4	4,1	3,8	4,7	4,4	2,9	2,8
LE5	+	116,9	3,9	3,8	3,7	3,6	2,5	2,5
PA6	29,6	24,9	5,9	5,7	3,3	3,3	2,7	2,7
PV7	7,0	6,5	3,2	3,1	3,6	3,4	2,7	2,6
CH8	8,8	8,1	3,0	2,9	3,4	3,3	2,4	2,4
Balanço +	3	1	0	0	0	0	0	0
N.Ciclos	15,7	42,6	3,9	3,8	3,8	3,7	2,6	2,6
s(x)	4,0	18,6	0,4	0,3	0,4	0,3	0,2	0,1

Para o potássio, Figura 9, diferentemente do N e do P, a maior parte do estoque do sistema encontra-se no solo, com valor médio de 31%, e com sítios variando de 18 a 58%. Assim, apesar de menos frágil, em média, comparativamente ao N e P, há sítios como o LI1 (litossolo arenoso com 30 cm de profundidade), em que o K passa a ser mais concentrado na parte aérea (58%), sendo neste caso, tão importante para a sustentabilidade como o N e o P. Reissmann; Koehler; Paula Souza (1990), observaram

correlação entre o teor de potássio (K) extraído do solo e os teores de K das acículas em *P.taeda*.

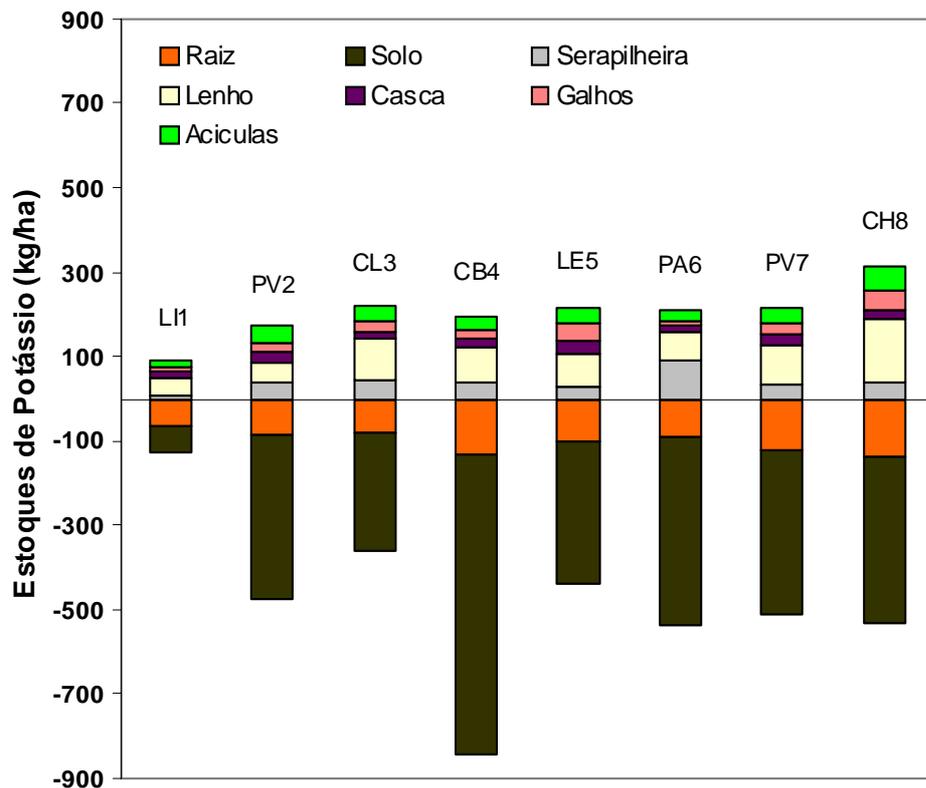


Figura 9 – Estoques de potássio (K) disponível no solo até 100 cm, e nos compartimentos das florestas de *P.taeda* ajustadas para 25 anos, nos 8 sítios do estudo

Analisando a tabela 26 é possível observar que com o sistema mais conservacionista (sistema de colheita apenas lenho, sem erosão e sem queima), 7, dos 8 sítios, possuem balanço positivo, e que o impacto da queima é enorme, reduzindo para 1 ou 2, os sítios com balanço positivo. O impacto da remoção da árvore inteira é também significativo, reduzindo também para 1 ou 2 ciclos, mesmo sem a queima.

Tabela 26 – Estimativa do número de ciclos necessários para zerar o conteúdo de **Potássio (K)** do sistema (K solúvel no solo de 0 a 100 cm, serapilheira e na floresta) de 8 sítios de *P.taeda* de diferentes produtividades, de acordo com o manejo de resíduos, tipo de colheita e grau de erosão a cada ciclo de 25 anos, considerando as produtividades e remoções de nutrientes atuais

Resíduo	Sem Queima				Com Queima			
	Lenho		Inteira		Lenho		Inteira	
Erosão	0 cm	2 cm	0 cm	2 cm	0 cm	2 cm	0 cm	2 cm
Sítio								
LI1	+	+	+	+	+	+	+	+
PV2	+	+	37,6	25,9	+	130,2	17,7	14,6
CL3	+	+	9,2	8,2	12,0	10,3	6,8	6,3
CB4	+	+	25,2	13,3	39,3	16,4	17,0	10,6
LE5	+	+	9,9	8,8	20,0	16,2	7,9	7,2
PA6	+	+	+	49,1	31,4	19,0	15,3	11,6
PV7	+	+	11,8	10,4	18,1	15,1	9,1	8,3
CH8	25,3	20,5	5,3	5,1	7,1	6,6	4,7	4,5
Balanco +	7	7	2	1	2	1	1	1
N.Ciclos	25,3	20,5	16,5	17,3	21,3	30,6	11,2	9,0
s(x)	-	-	5,1	5,5	4,9	15,6	1,9	1,2

Os estoques de cálcio no sistema (Figura 10), mostram que ele segue o padrão do K, com a maior parte do estoque no solo (valor médio de 33%, e com sítios variando de 13 a 60%). Da mesma forma, há sítios pouco sustentáveis e muito frágeis no manejo do Ca, como o LI1 e o CL3. Reissmann; Wisnewski (2000) observam que os sintomas de deficiências de Cálcio, apesar de não serem muito freqüentes, não devem ser desprezados em virtude das altas taxas de exportação observadas para este nutriente.

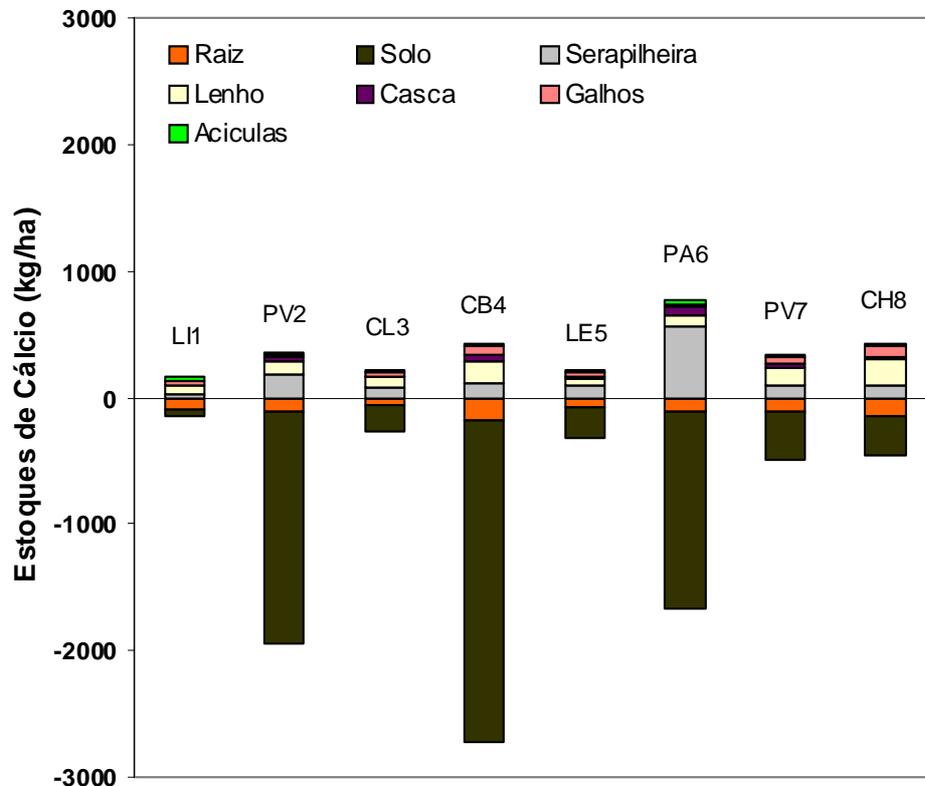


Figura 10 – Estoques de cálcio (Ca) disponível no solo até 100 cm, e nos compartimentos das florestas de *P. taeda* ajustadas para 25 anos, nos 8 sítios do estudo

Pela tabela 27 observa-se que o Cálcio é o nutriente que apresenta o maior número de balanços positivos nos oito possíveis cenários. Como os maiores estoques de Cálcio se encontram no solo, é possível observar que quando analisados os sítios individualmente, ocorre forte impacto da erosão na sustentabilidade (número de ciclos) dos manejos utilizados. No entanto, a queima e a remoção de árvores inteiras são também de alto impacto para definir o número de sítios com balanços positivos.

Tabela 27 – Estimativa do número de ciclos necessários para zerar o conteúdo de **Cálcio (Ca)** do sistema (Ca solúvel no solo de 0 a 100 cm, serapilheira e na floresta) de 8 sítios de *P.taeda* de diferentes produtividades, de acordo com o manejo de resíduos, tipo de colheita e grau de erosão a cada ciclo de 25 anos, considerando as produtividades e remoções de nutrientes atuais

Resíduo	Sem Queima				Com Queima			
	Lenho		Inteira		Lenho		Inteira	
	0 cm	2 cm	0 cm	2 cm	0 cm	2 cm	0 cm	2 cm
Sítio								
LI1	+	+	+	+	+	+	+	+
PV2	+	+	233,9	25,0	50,3	18,0	24,1	12,9
CL3	+	+	+	+	+	+	82,7	48,7
CB4	+	14,3	22,5	8,7	27,0	9,3	16,2	7,5
LE5	+	+	+	+	+	+	+	103,5
PA6	+	+	74,0	27,4	10,4	8,4	8,4	7,0
PV7	+	+	9,1	7,6	11,7	9,4	6,3	5,6
CH8	20,1	15,7	5,3	4,9	6,2	5,7	4,2	4,0
Balanco +	7	6	3	3	3	3	2	1
N.Ciclos	20,1	15,0	69,0	14,7	21,1	10,2	23,6	27,0
s(x)	-	0,7	43,0	4,7	8,1	2,1	12,2	14,1

Na Figura 11 a compartimentalização dos estoques de magnésio mostra que ele é praticamente uma repetição do cálcio, em termos de percentuais na parte aérea e do solo no sistema.

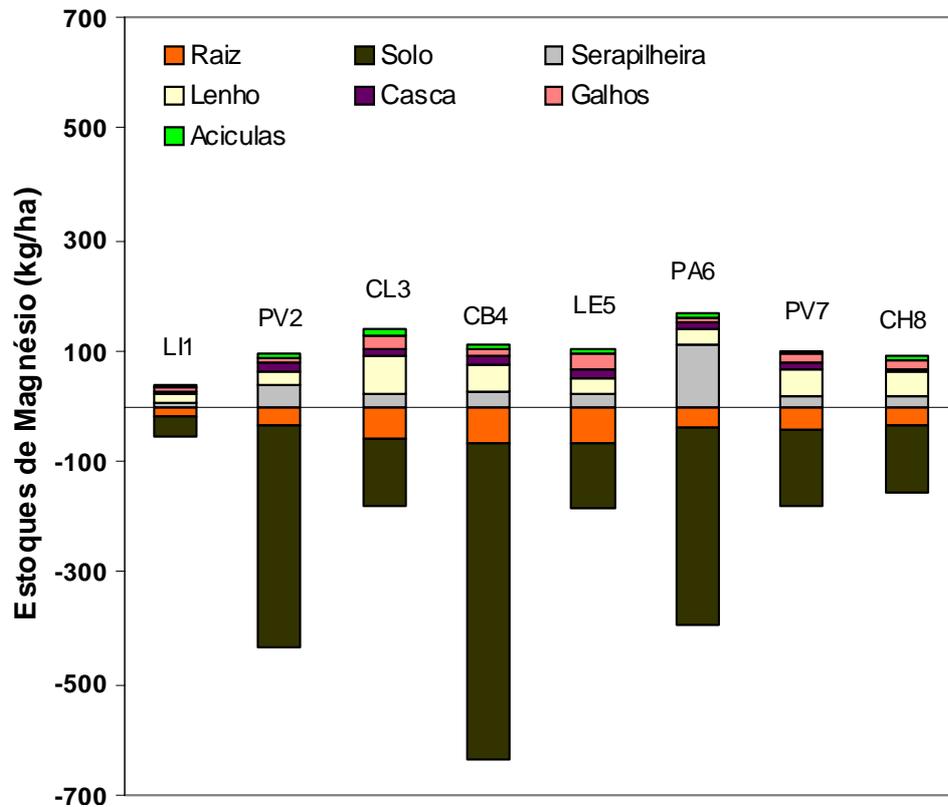


Figura 11 – Estoques de magnésio (Mg) disponível no solo até 100 cm, e nos compartimentos das florestas de *P.taeda* ajustadas para 25 anos, nos 8 sítios do estudo

Na tabela 28, observa-se que o número de balanços positivos no sistema de colheita somente lenho, sem erosão e sem queima é de 5, sendo rapidamente reduzido para apenas 1 por efeito da queima ou da remoção da árvore inteira.

Tabela 28 – Estimativa do número de ciclos necessários para zerar o conteúdo de **Magnésio (Mg)** do sistema (Mg solúvel no solo de 0 a 100 cm, serapilheira e na floresta) de 8 sítios de *P.taeda* de diferentes produtividades, de acordo com o manejo de resíduos, tipo de colheita e grau de erosão a cada ciclo de 25 anos, considerando as produtividades e remoções de nutrientes atuais

Resíduo	Sem Queima				Com Queima			
	Lenho		Inteira		Lenho		Inteira	
Erosão	0 cm	2 cm	0 cm	2 cm	0 cm	2 cm	0 cm	2 cm
Sítio								
LI1	+	+	+	+	+	+	+	+
PV2	+	+	38,3	18,7	46,9	20,6	17,5	11,8
CL3	13,6	12,3	4,5	4,4	5,8	5,5	3,9	3,8
CB4	118,0	15,7	17,6	8,9	22,3	10,0	13,9	7,9
LE5	+	+	8,3	7,7	16,4	14,4	6,3	6,0
PA6	+	+	55,8	25,4	12,5	9,9	9,4	7,8
PV7	181,9	48,9	7,4	6,7	11,0	9,4	6,1	5,6
CH8	+	92,3	8,3	7,7	11,8	10,6	6,6	6,2
Balanco +	5	4	1	1	1	1	1	1
N.Ciclos	104,5	42,3	20,0	11,4	18,1	11,5	9,1	7,0
s(x)	49,0	18,6	7,4	2,9	5,2	1,8	1,9	1,0

A tabela 29 apresenta uma estimativa da ordem provável de limitação dos nutrientes estudados na sustentabilidade dos sítios para um cenário conservacionista de colheita apenas do lenho, com cultivo mínimo e sem erosão.

Tabela 29 – Estimativa da ordem de provável limitação de nutriente para a sustentabilidade, por sítio, e para todos os sítios, usando o manejo sem queima, colhendo só o lenho, e sem erosão. O número entre parênteses representa o número de ciclos de 25 anos para zerar o estoque considerando as produtividades e remoções padrões de 25 anos, e os estoques disponíveis no solo, serapilheira e floresta

Sítio Sigla	Ordem de Provável Limitação de Nutriente			
	1	2	3	4
LI1	P (17,2)	N (32,6)	-	-
PV2	N (33,0)	-	-	-
CL3	Mg (13,6)	P (16,1)	N (42,4)	-
CB4	N (19,2)	Mg (118,0)	-	-
LE5	N (16,3)	-	-	-
PA6	N (17,9)	P (29,6)	-	-
PV7	P (7,0)	N (26,2)	Mg (181,9)	-
CH8	P (8,8)	N (17,3)	Ca (20,1)	K (25,3)
Todos	N	P	Mg	K, Ca
Balanco +	0	3	5	7

A ordem de risco de limitação nutricional média, observada para o cenário conservacionista, é: N > P > Mg > K,Ca, baseando-se no número de balanços positivos e no número de ciclos médios para os balanços negativos.

Embora esta ordem média sirva para identificar o N e o P como os mais críticos, devido provavelmente a sua maior concentração na biomassa aérea, e ainda por estarem altamente correlacionados com o IMA, deve ficar claro que existem exceções sítio-específicas. Por exemplo, no sítio CL3, o magnésio se mostra como o mais crítico.

A tabela 30 apresenta uma estimativa da ordem provável de limitação dos nutrientes estudados na sustentabilidade dos sítios para um cenário de manejo intensivo, com colheita da árvore inteira, queima e erosão de 2 cm por ciclo.

Tabela 30 – Estimativa da ordem de provável limitação de nutriente para a sustentabilidade, por sítio, e para todos os sítios, usando o manejo com queima, colhendo árvore inteira, e com erosão (2 cm). O número entre parênteses representa o número de ciclos de 25 anos para zerar o estoque considerando as produtividades e remoções padrões de 25 anos, e os estoques disponíveis no solo, serapilheira e floresta

Sítio Sigla	Ordem de Provável Limitação de Nutriente			
	1	2	3	4
LI1	N (2,1)	P (2,2)	-	-
PV2	N (2,8)	P (3,3)	Mg (11,8)	Ca (12,9)
CL3	N (1,9)	P (2,2)	Mg (3,8)	K (6,3)
CB4	P (2,4)	N (3,1)	Ca (7,5)	Mg (7,9)
LE5	N (2,3)	P (2,5)	Mg (6,0)	K (7,2)
PA6	N (2,0)	P (2,7)	Ca (7,0)	Mg (7,8)
PV7	P (2,6)	N (3,4)	Ca, Mg (5,6)	K (8,3)
CH8	P (2,4)	N (2,9)	Ca (4,0)	K (4,5)
Todos Balanço +	N 0	P 0	Mg, K, Ca 1	- -

Comparando as Tabela 29 e 30, verifica-se como o sistema mais intensivo afetou drasticamente a sustentabilidade de todos os sítios, existindo apenas 1 balanço positivo para Mg, K e Ca, para todos os sítios estudados.

Para tentar sintetizar os efeitos dos fatores de manejo (colheita, resíduos e erosão) na sustentabilidade, escolheu-se o número de ciclos para zerar o estoque do nitrogênio, haja vista os seguintes fatores: i) apresentou alta correlação com o IMA, ii) mais concentrado na parte aérea do sistema, e iii) nunca apresenta balanço positivo, mesmo no sistema mais conservacionista.

Assim, a Figura 12 apresenta a média, e uma barra de 1 desvio padrão da média, dos efeitos dos fatores e seus níveis, para os 8 cenários possíveis, nos oito sítios do estudo.

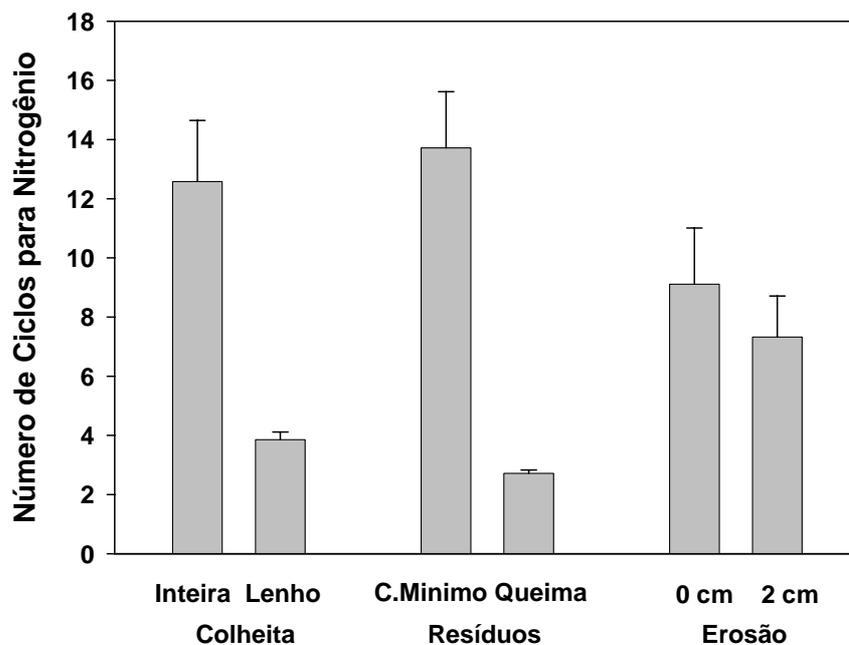


Figura 12 – Número estimado de ciclos de 25 anos de *P.taeda* para zerar o conteúdo de nitrogênio no sistema (mineralizável até 100 cm de profundidade, serapilheira e floresta) em função do manejo da floresta, e para os 8 sítios estudados. As barras representam o desvio padrão da média (n = 32)

Fica claro pela análise da Figura 12, que a ordem de maior impacto na sustentabilidade do sistema para *P.taeda*, tomando o nitrogênio como indicador, é: Cultivo Mínimo/Queima > Lenho/Árvore Inteira > Sem/Com Erosão. Como fator principal, a prática da queima reduz o número de ciclos de 13.7 para 2.7, enquanto que a remoção da árvore inteira reduz de 12.6 para 3.9, e a erosão reduz de 9.1 para 7.0.

Ranger; Turpault, 1999; Corbeels; McMurtrie, 2002; Gonçalves et al (2002) apresentam trabalhos que confirmam os resultados encontrados neste estudo.

Face à tendência de se eliminar o fogo na área florestal, e pelo fato do cultivo mínimo reduzir drasticamente a erosão laminar, fica concentrado no método de colheita, o potencial de se intensificar ou aliviar o impacto da produção de madeira sobre a sustentabilidade do sistema.

Assim, para proporcionar estimativas práticas do efeito destas decisões, elaborou-se a Tabela 31 que contém as taxas de exportação de nutrientes para o *P.taeda* por m³ de madeira colhida, comparando o sistema de colheita apenas lenho frente à remoção da árvore inteira.

Tabela 31 – Taxa de exportação de nutrientes do *P. taeda* expressa como kg de nutriente removido por m³ com casca de madeira colhida, num sistema de colheita só do lenho (Lenho) ou da árvore inteira (Inteira), com cultivo mínimo e sem erosão. A coluna AE representa ao aumento percentual na exportação pelo sistema de árvore inteira, comparativamente a só o lenho sem casca

Solo	N (kg N m ⁻³)			P (kg P m ⁻³)			K (kg K m ⁻³)			Ca (kg Ca m ⁻³)			Mg (kg Mg m ⁻³)		
	Lenho	Inteira	AE(%)	Lenho	Inteira	AE(%)	Lenho	Inteira	AE(%)	Lenho	Inteira	AE(%)	Lenho	Inteira	AE(%)
LI1	0,518	1,438	178	0,039	0,115	195	0,112	0,233	108	0,183	0,337	84	0,047	0,089	89
PV2	0,463	1,049	127	0,018	0,059	228	0,110	0,278	153	0,182	0,357	96	0,050	0,115	130
CL3	0,437	1,008	131	0,036	0,079	119	0,204	0,338	66	0,172	0,271	58	0,132	0,217	64
CB4	0,490	0,857	75	0,018	0,043	139	0,163	0,269	65	0,314	0,531	69	0,095	0,150	58
LE5	0,507	1,155	128	0,018	0,071	294	0,139	0,339	144	0,094	0,231	146	0,051	0,139	173
PA6	0,562	1,036	84	0,027	0,060	122	0,121	0,225	86	0,176	0,379	115	0,049	0,102	108
PV7	0,415	0,845	104	0,044	0,078	77	0,169	0,329	95	0,265	0,468	77	0,080	0,148	85
CH8	0,455	0,980	115	0,040	0,090	125	0,226	0,408	81	0,314	0,500	59	0,065	0,110	69
Média	0,481	1,046	117	0,030	0,074	147	0,155	0,302	95	0,212	0,384	81	0,071	0,134	89
s(x)	0,017	0,066		0,004	0,008		0,015	0,022		0,027	0,038		0,011	0,014	

AE% - Aumento na taxa de exportação de nutrientes por m³ colhido no sistema de árvores inteiras quando comparados com o sistema de colheita somente lenho.

Tomando como exemplo o Nitrogênio, observa-se que, na média para os oito sítios estudados, a colheita apenas do lenho, reduz a taxa de exportação de 1,046 kg N/m³ para 0,481 kg N m⁻³, ou sobre outra ótica, houve um aumento na taxa de exportação de N de 117% com a mudança do sistema de colheita de apenas lenho para árvore inteira.

Os nutrientes estudados apresentaram a seguinte ordem de sensibilidade à mudança do sistema de manejo: P (147%) > N (117%) > K (95%) > Mg (89%) > Ca (81%). Tal ordem já esperada, face à maior concentração de N e P na parte aérea do sistema solo-floresta.

2.3.8. Produtividade *versus* Sustentabilidade

Para tentar visualizar qual a relação existente entre produtividade e sustentabilidade, uma vez que esta questão não é de fácil resposta, podem ser consideradas duas lógicas distintas. Na primeira, espera-se que sítios mais produtivos estejam sobre solos mais férteis, com maiores estoques de nutrientes, de forma que seriam mais sustentáveis. Na segunda, os sítios mais produtivos seriam menos sustentáveis por extraírem maiores quantidades de nutrientes a cada rotação. Na verdade, nota-se que a resposta é dependente do balanço de entrada-saída e do estoque do sistema.

Assim, para esta região de estudo, onde o nitrogênio se mostrou como o melhor indicador de sustentabilidade, averiguou-se tal questão fazendo-se o gráfico do número de ciclos de nitrogênio (sustentabilidade) *versus* a produtividade (IMA) dos sítios. A relação está na Figura 13.

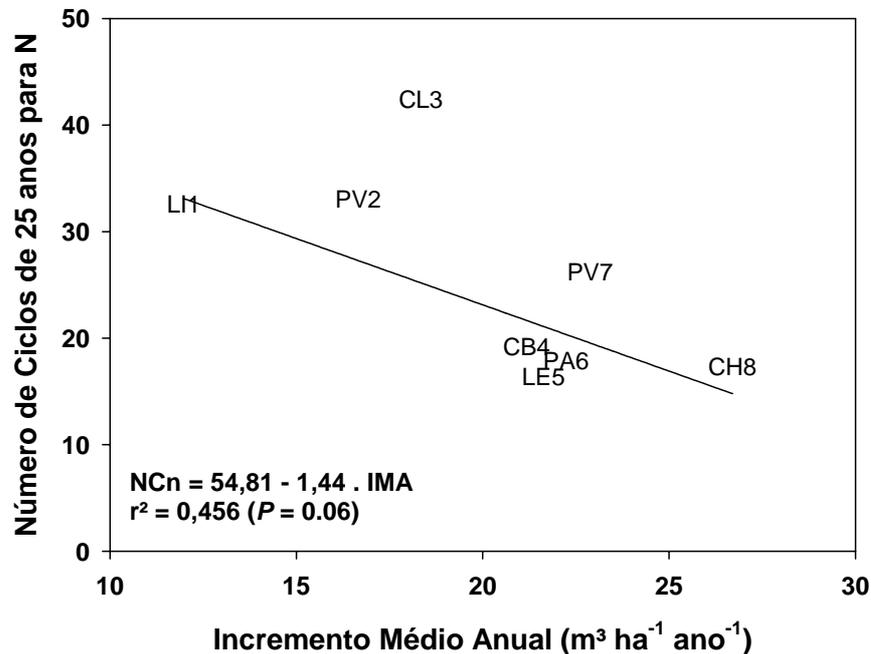


Figura 13 – Relação entre o número de ciclos (NCn) de 25 anos para zerar o estoque de nitrogênio no sistema (solo até 100 cm, serapilheira e floresta) e a produtividade florestal (IMA), considerando o manejo com colheita só do lenho, cultivo mínimo e sem erosão

Observa-se na Figura 13 que para a região estudada, os sítios mais pobres tendem a suportar um maior número de ciclos de produção até que os estoques de Nitrogênio sejam exauridos. Sítios mais produtivos tendem a atingir a exaustão mais rapidamente. Deve-se lembrar que os níveis de produção são distintos, de forma que o sítio mais fraco sustenta por mais longo tempo ciclos de baixa produção.

Este resultado serve para evidenciar que embora os sítios mais produtivos muitas vezes aparentem ser os mais sustentáveis, eles podem estar exaurindo o sistema em taxas muito altas, de forma a produzir em poucas rotações um colapso na produtividade.

Assim, se ainda hoje há pouca fertilização em *P. taeda* no Brasil, há evidências de que a manutenção de patamares elevados de produtividade dependerá não só do uso de fertilizantes, mas talvez, principalmente, da implementação de princípios conservacionistas de cultivo mínimo, colheita mínima e controle máximo de erosão, por parte dos silvicultores.

3. CONCLUSÕES

Com base no estudo de oito sítios de *P.taeda* representativos das condições edafo-climáticas do nordeste do Estado do Paraná e sul de São Paulo, podemos concluir que:

A produtividade florestal, que variou de 11 a 27 m³ ha⁻¹ ano⁻¹, foi significativamente correlacionada com as estimativas dos teores de nitrogênio mineralizável ($r^2 = 0,722$) e fósforo disponível ($r^2 = 0,702$) até 100 cm de profundidade, assim como o índice de sítio (variação de 18 a 29 m);

O nitrogênio e o fósforo diferenciaram-se dos demais nutrientes por apresentarem maiores concentrações na parte aérea do sistema solo-floresta, com valores de 50% e 60%, respectivamente;

A análise do número de ciclos, evidenciou que o nitrogênio é o único nutriente que nunca apresenta balanço positivo, mesmo para o cenário mais conservacionista. Neste cenário (remoção só do lenho, cultivo mínimo e sem erosão) o número de ciclos é de 25,6, se reduzindo a 2,6 ciclos no cenário mais intensivo (árvore inteira, queima, com 2 cm de erosão por ciclo);

Em geral, para os oito sítios, a ordem de risco de limitação nutricional pode ser estabelecida como: N > P > Mg > K,Ca, baseando-se no número de balanços positivos e no número de ciclos médios para os balanços negativos. No entanto, há situações sítio-específicas, em que esta ordem se altera;

Todos os nutrientes foram altamente impactados pelo uso da queima contrapondo-se ao cultivo mínimo, pela colheita da árvore inteira em relação à remoção só do lenho, e pela erosão, nesta ordem de relevância.

Os nutrientes estudados apresentaram a seguinte ordem de sensibilidade à mudança do sistema de manejo: P (147%) > N (117%) > K (95%) > Mg (89%) > Ca (81%), o que está relacionado à distribuição deles nos compartimentos do ecossistema;

Tomando o nitrogênio como indicador de sustentabilidade, evidencia-se que os sítios mais pobres tendem a suportar um maior número de ciclos de produção até que os estoques sejam exauridos. Sítios mais produtivos tendem a atingir a exaustão mais rapidamente.

A utilização de balanços de entrada-saída de nutrientes se mostrou uma ferramenta útil de análise da sustentabilidade da produtividade florestal, necessitando porém de validação;

Evidencia-se que a manutenção ou elevação da produtividade do *P.taeda* dependerá não só do uso de fertilizantes, mas talvez, principalmente, da implementação de princípios conservacionistas de cultivo mínimo, colheita mínima e controle máximo de erosão no manejo florestal.

REFERÊNCIAS

- ARCOVA, F.C.S.; LIMA, W.P. Balanço dos nutrientes Ca^{+2} , Mg^{+2} , Na^{+1} , K^{+1} e NO_3^{-1} em bacia hidrográfica experimental com vegetação natural do Parque Estadual da Serra do Mar - Núcleo Cunha - SP. **IPEF**, Piracicaba, n.31, p.61-7, 1985.
- BARROS, N.F.; COMERFORD, N.B. Sustentabilidade da produção de florestas plantadas na região tropical. In: Sociedade Brasileira de Ciência do solo. **Tópicos em ciência do solo**. Viçosa, MG:, 2002, p.487-592.
- BARROS, N.F.; NEVES, J.C.L.; NOVAIS, R.F. Recomendação de fertilizantes minerais em plantios de eucalipto. In: GONÇALVES, J.L.M.; BENEDETTI, V. **Nutrição e fertilização florestal**. Piracicaba: IPEF, 2000, p.270-286.
- BATTAGLIA, M. et al. A linked carbon, water and nitrogen model of forest growth for silvicultural decision support. **Forest Ecology and Management**, v. 193, p. 251-282, 2004.
- BRAGA, G.R. Adubação e calagem em Pinus sp. **Brasil Florestal**, Brasília, v.4, n.14, p.3-8, abr./jun.1973.
- CÂMARA, C.D.; LIMA, W.P.; VIEIRA, S.A. Corte raso de uma plantação de Eucalyptus saligna de 50 anos: impactos sobre a ciclagem de nutrientes em uma microbacia experimental. **Scientia Forestalis**, Piracicaba, n.57, p.99 –109, jun. 2000.
- CARTER, M.C., FOSTER, D. Prescribed burning and productivity in southern pine forests: a review. **Forest Ecology and Management**, v.191, p. 93-109, 2004.
- CERRI, C.E. et al. **Efeito da queima na perda de nutrientes e na biologia do solo**. Piracicaba: ESALQ, Departamento de Ciências Florestais, 1998, 31p. Relatório de trabalho de pesquisa apresentada na disciplina de PG, LCF-723 Fertilidade e Manejo de Solos Florestais.
- CERTINI, G. Effects of fire on properties of Forest soils: a review. **Oecologia**, Curitiba, v. 143, p. 1-10, 2005.
- CORBEELS, M.; McMURTRIE, R.E. Soil N constraints on productivity of eucalypt plantations with different harvest management. In: WORLD CONGRESS OF SOIL SCIENCE, 2002. Tailândia. Trabalhos: **Soil Science**, 2002, CD ROM.
- CURCIO, G.R.; WISNIEWSKI, C.; RACHWAL, M.F.G. Análise comparativa de características e propriedades químicas, físicas e morfológicas de um Cambissolo textura argilosa, sob plantio de pinus e capoeira. In: CONGRESSO FLORESTAL PAN-AMERICANO, 1.; CONGRESSO FLORESTAL BRASILEIRO, 7., Curitiba. **Anais...** Curitiba, SBS, 1993, p. 732.

EMBRAPA. **Sistema brasileiro de classificação de solos**. Centro nacional de pesquisa de solos (Rio de Janeiro, RJ). Rio de Janeiro: Embrapa Solos, 1999. 412p.

FERREIRA, C.A. et al. Nutrição de pinus no sul do Brasil: diagnóstico e prioridades de pesquisa. **Documentos EMBRAPA Florestas**, Paraná, n.60, p.1-23, nov.2001.

FISHER, R.F.; BINKLEY, D. **Ecology and management of forest soils**. 3rd ed. New York: Wiley, 2000, 489p.

FLOR, H.M. Estudos sobre produção e forma do fuste do Pinus taeda L. numa área de ensaio de adubação na Fazenda Canguiri. **Floresta**, Curitiba, v.8, n.1, p.69-70, jun.1977.

FOX, T. R. Sustained productivity in intensively managed forest plantations. **Forest Ecology and Management**, v.138, p.187-202, 2000.

GONÇALVES, J.L.M. Recomendações de adubação para Eucalyptus, Pinus e espécies típicas da Mata Atlântica. **Documentos Florestais**, Piracicaba, n.15, p.1-23, 1995.

GONÇALVES, J.L.M. et al. Manejo de resíduos vegetais e preparo do solo. In: GONÇALVES, J.L.M.; STAPE, J.L. **Conservação e cultivo de solos para plantações florestais**. Piracicaba: 2002, p.133-204.

GONÇALVES, J. L. M.; MENDES, K.C.F.S; SASAKI, C. M. Mineralização de nitrogênio em ecossistemas florestais naturais e implantados do estado de São Paulo. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, Viçosa, v.25, n. 3, 2001, p. 601-616.

GONÇALVES, J.L.M.; STAPE, J.L.; BENEDETTI, V.; FESSEL, V.A.G.; GAVA, J.L. Reflexos do cultivo mínimo e intensivo do solo em sua fertilidade e na nutrição das árvores. In: GONÇALVES, J.L.M.; BENEDETTI, V. **Nutrição e fertilização florestal**. Piracicaba: 2000, p.3-57.

HAAG, H.P. **Nutrição mineral de eucalyptus, pinus, araucaria e gmelina no Brasil**. Campinas, Fundação Cargill, 1983, 210p.

HAAG, H.P.; ROCHA FILHO, J.V.C.; OLIVEIRA, G.D. Ciclagem de nutrientes em florestas implantadas de Eucalyptus e Pinus. II. Contribuição das espécies de nutrientes na manta. **O solo**, Piracicaba, SP, v.70, n2, p. 28-31, jul./dez., 1978.

KIMMINS, J.P. Identifying key processes affecting long-term site productivity. In: DYCK, W.J.; COLE, D.W.; COMERFORD, N.B. **Impacts of forest harvesting on long-term site productivity**. Britain: 1994, p.119-150.

KOEHLER, C.W. **Variação estacional da deposição de serapilheira e de nutrientes em povoamentos de Pinus taeda na região de Ponta Grossa – PR**. 1989. 168 p. Tese (Doutorado em Ciências Florestais) – Universidade Federal do Paraná, Curitiba, 1989.

KRONKA, F.J.N.; BERTOLANI, F.; HERRERA-PONCE, R. **A cultura do Pinus no Brasil**. São Paulo: SBS, 160p., 2005.

LACLAU, J.P. et al. Nutrient cycling in a short rotation *Eucalyptus* plantation and an adjacent Savanna in Congo. In: NAMBIAR et al. **Site management and productivity in tropical plantation forests: a progress report**. Bogor, Indonesia: Center for International Forestry Research, 1999, p. 95-100.

LASO GARICOITS, L.S. **Estado nutricional e fatores do solo limitantes do crescimento do *P. taeda* L. em Telêmaco Borba (PR)**.1990. 128p. Dissertação (Mestrado) – Universidade Federal do Paraná, Curitiba, 1990.

LOPES, M.I.M.S.; MELLO, F.A.F.; GARRIDO, M.A.O. Influência do cultivo de Pinus sobre a manta orgânica e propriedades químicas de um latossolo vermelho-escuro primitivamente sob vegetação de cerrado. I. Efeito sobre a quantidade e composição da manta. **Anais da E.S.A. "Luiz de Queiroz"**, Piracicaba, v.40, p. 423-436, 1983.

MALUF, J.L.P. **Efeito da queima, métodos de preparo do solo e da adubação no crescimento de *E. camaldulensis* em Areia Quartzosa**. 1991. 78 p. Dissertação (Mestrado) – Universidade Federal de Viçosa, Viçosa, 1991.

MELO, V.F.; NOVAIS, R.F.; BARROS, N.F.; FONTES, M.P.F.; COSTA, L.M. Balanço nutricional, eficiência de utilização e avaliação da fertilidade do solo em P, K, Ca e Mg em plantios de eucalipto no Rio Grande do Sul. IPEF, Piracicaba, n. 48/49, p. 8-17, jun./dez., 1995.

MUNIZ, P.J.C.; BALDANZI, G.; PELLICO NETTO, S. Ensaio de adubação em Pinus elliotii e Pinus taeda no sul do Brasil. **Floresta**, Curitiba, v.6, n.1, p.5-13, jun.1975.

NEARY, D.G. et al. Fire effects on belowground sustainability: a review and synthesis. **Forest Ecology and Management**, v. 122, 1999, p. 51-71.

NOVAES, R.F.F.; POGGIANI, F. Deposição de folhas e nutrientes em plantações florestais puras e consorciadas de Pinus e Liquidambar. **IPEF**, Piracicaba, n.23, p.57-60, 1983.

OLIVEIRA, F.A. **Produção e qualidade da água em bacias hidrográficas contendo diferentes coberturas vegetais na região de Agudos, São Paulo**. Piracicaba, 1989. 82p. Tese (Mestrado). Escola Superior de Agricultura "Luiz de Queiroz", Universidade de São Paulo, 1989.

OLIVEIRA, J.T.S. Cresce presença do setor de base florestal. **Revista da Madeira**, Curitiba, PR, v.10, n.56, p.14-22, mai. 2001.

OKI, V.K. **Impactos da colheita de Pinus taeda sobre o balanço hídrico, a qualidade da água e a ciclagem de nutrientes em microbacias**. 2002. 71 p. Dissertação

(Mestrado em Ciências Florestais) – Escola Superior de Agricultura “Luiz de Queiroz”, Universidade de São Paulo, Piracicaba, 2002.

PESSOTTI, J.E. Levantamento de solos na Pisa Florestal. Jaguariaíva, Paraná: 1999, 63 p.

POGGIANI, F. Ciclo de nutrientes e produtividade de florestas implantadas. **Silvicultura**, São Paulo, v.1, p.45-48, 1976.

POGGIANI, R.; SCHUMACHER, M.V. Atmospheric inputs compared with nutrients removed by harvesting from *Eucalyptus* plantation. Implications for sustainability. In: IUFRO CONFERENCE ON SILVICULTURE AND IMPROVEMENT OF *EUCALYPTUS*, Salvador. **Anais...** Colombo: EMBRAPA/CNPF, 1997, v.3, p.68 -74.

POWERS, R.F. On the sustainable productivity of planted forests. **New forests**, Netherlands, v.17, p.263-306, 1999.

QUINTEROS DOLDAN, M.E. Desenvolvimento da altura dominante de *Pinus taeda* L., como resposta aos estímulos dos fatores do meio, na região de Ponta Grossa. 1987. 119p. Dissertação (Mestrado) – Universidade Federal do Paraná, Curitiba, 1987.

RANGER, J.; TURPAULT, M. Input-output nutrient budgets as a diagnostic tool for sustainable forest management. **Forest Ecology and Management**, v.122, p.139-154, 1999.

REISSMANN, C.B.; ZÖTTL, H.W. Problemas nutricionais em povoamentos de *Pinus taeda* em áreas do arenito da formação rio Bonito - grupo guata. **Revista Setor de Ciências Agrárias**, Paraná, v.9, n.1/2, p.75-80, 1987.

REISSMANN, C.B.; KOEHLER, C.W.; PAULA SOUZA, M.L.de. **Classificação de sítio para *Araucaria angustifolia*, *Pinus taeda* e *Pinus elliottii* no 2º Planalto do Paraná**. Subprojeto I. Nutrição. UFPR/FUNPAR/FINEP, Curitiba, v. 1, 1990, p. 1-286.

REISSMANN, C.B.; WISNEWSKI, C. Aspectos nutricionais de plantios de *Pinus*. In: GONÇALVES, J.L.M.; BENEDETTI, V. **Nutrição e fertilização florestal**. Piracicaba: IPEF, 2000, p.134-65.

SBS. **Estatísticas**, 2000. Disponível em: <http://www.sbs.org.br/estatisticas.htm>. Acesso em 05 out. 2005.

SCHULTZ, R. P. Loblolly – the pine for the twenty-first century. **New Forests**, Netherlands, v.17, p.71–88, 1999.

SHIMIZU, J. Silvicultura de *Pinus* para o sul do Brasil. **Revista da Madeira**, Curitiba, PR, v.6, n.37, 1997, p.32-5.

- SLOOTEN, H.J. van der et al. Levantamento da madeira de *P. elliottii* em plantios do Sul do Brasil, Brasília, DF: Projeto de Desenvolvimento e Pesquisa Florestal – PRODEPEF, **Série Técnica PRODEPEF**, V. 5, 1976, 47p.
- SOAVE, R.C.F.; PAGANO, S.N. Aspectos da ciclagem de nutrientes em povoamentos de *Pinus elliottii* Engelm. Var. *elliottii* aplicando-se diferentes técnicas de extração de resina. I – Produção de serapilheira. **Arquivos de Biologia e Tecnologia**, v 37, n 3, p. 703-709, set., 1994a.
- SOAVE, R.C.F.; PAGANO, S.N. Aspectos da ciclagem de nutrientes em povoamentos de *Pinus elliottii* Engelm. Var. *elliottii* empregando-se diferentes intensidades de resinagem. II – Nutrientes minerais na serapilheira. **Arquivos de Biologia e Tecnologia**, v 37, n 3, p. 711-721, 1994b.
- STAPE, J.L. Production ecology of clonal Eucalyptus plantations in northeastern Brazil. 2002. 225 p. Tese (Doutorado) – Colorado State University, Fort Collins, 2002.
- STAPE, J.L.; MORA, A.L.; MAESTRI, R. **Linhas de ação em solos e manejo na Pista Florestal em bases ecofisiológicas**. Relatório de projeto IPEF, Piracicaba, 1998, 27p.
- STAPE, J.L.; BENEDETTI, V. Decréscimo de produtividade e respostas da brotação do Eucalyptus grandis a fertilização com macronutrientes em areia quartzosa no estado de São Paulo - Brasil. In: IUFRO CONFERENCE ON SILVICULTURE AND IMPROVEMENT OF EUCALYPTS, 1997, Salvador. **Anais...** Colombo: EMBRAPA/CNPQ, 1997, v.3, p.112-7.
- STAPE, J.L. et al. Definição de métodos de preparo de solo para silvicultura em solos coesos do litoral norte da Bahia. In: GONÇALVES, J.L.M.; STAPE, J.L. **Conservação e cultivo de solos para plantações florestais**. Piracicaba: 2002, p. 259-296.
- STAPE, J. L.; BINKLEY, D.; RYAN, M. G. *Eucalyptus* production and the supply, use and the efficiency of use of water, light and nitrogen across a geographic gradient in Brazil. **Forest Ecology and Management**, 193: 17-31, 2004.
- THORNTHWAITE, C.W.; MATHER, J.R. The water balance. Drexel Inst. Tech. Publ. in Climatol, V. 8, 1955, P. 1-104.
- THORNTHWAITE, C.W.; MATHER, J.R. **The water balance**. Centerton, NJ: Drexel Institute of Technology, Laboratory of Climatology, Publications in Climatology, v. 8, n.1, 1955. 104p.
- VALERI, S.V. **Exportação de biomassa e nutrientes de povoamentos de Pinus taeda L. desbastados em diferentes idades**. 1988. 164 p. Tese (Doutorado em Ciências Florestais), Universidade Federal do Paraná, UFPR, Curitiba, 1988.
- VITAL, A.R.T.; LIMA, W.P.; CAMARGO, F.R.A. Efeitos do corte raso de plantação de Eucalyptus sobre o balanço hídrico, a qualidade da água e as perdas de solo e de

- nutrientes em uma microbacia no Vale do Paraíba, SP. **Scientia Forestalis**, Piracicaba, n.55, p. 5-16, jun.1999.
- VITAL, A.R.T.; LIMA, W.P.; POGGIANI, F.; CAMARGO, F.R. Biogeoquímica de uma microbacia após o corte raso de uma plantação de eucalipto de 7 anos de idade. **Scientia Forestalis**, Piracicaba, n.55, p.17-28, jun.1999.
- THOMAS, A.D.; WALSH, R.P.D.; SHAKESBY, R.A. Nutrient losses in eroded sediment after fire in eucalyptus and pine forests in the wet Mediterranean environment of northern Portugal. **Catena**, v.36, p.283–302, 1999.
- WATERLOO, M.J. **Water and nutrient dynamics of *Pinus caribaea* plantation forests on former grasslands soils in Southwest Viti Levu, Fiji**. 1994. 478 p. Tese (Doutorado), Universidade de Vrije, Amsterdam, 1994.
- WISNIEWSKI, C.; REISSMANN, C.B. Deposição de serapilheira e de nutrientes em plantios de *Pinus taeda* L. na região de Ponta Grossa – PR. **Arquivos de Biologia e Tecnologia**, Paraná, v 39, n2, p. 435-442, jun., 1996.
- WICHERT, M.C.P. **Erosão hídrica e desenvolvimento inicial do *Eucalyptus grandis* em um Argissolo Vermelho-Amarelo submetido a diferentes métodos de preparo de solo no Vale do Paraíba-SP**. 2005. 83p. Dissertação (Mestrado em Recursos Florestais) – Escola Superior de Agricultura “Luiz de Queiroz”, Universidade de São Paulo, 2005.

ANEXOS

ANEXO A - Concentração de nutrientes por compartimento

(continua)

Solo	Compartimento	N	P	K	Ca	Mg
		g Kg ⁻¹				
LI1	Lenho	1,2	0,1	0,3	0,4	0,1
	Casca	3,0	0,3	0,7	0,5	0,2
	Galho Grosso	1,9	0,2	0,2	0,6	0,2
	Galho Fino	4,0	0,4	0,5	0,9	0,3
	Acícula	15,1	1,1	1,7	1,9	0,4
	Cone	...	...	...	...	...
	Raiz Grossa	3,6	0,2	0,6	0,7	0,2
	Raiz Pivotante	1,6	0,1	0,4	0,6	0,1
	Raiz Total	5,2	0,3	1,0	1,4	0,3
	Serap. Pouco Decomposta	40,4	1,6	1,9	13,0	1,9
	Serap. Lenhosa	26,9	1,6	0,9	7,9	0,8
	Serap. Muito Decomposta	219,3	12,3	5,1	6,2	1,9
PV2	Lenho	1,0	0,0	0,2	0,4	0,1
	Casca	4,6	0,3	1,1	2,5	0,8
	Galho Grosso	1,4	0,1	0,6	0,8	0,2
	Galho Fino	3,5	0,3	0,9	1,2	0,6
	Acícula	15,1	1,0	4,5	1,7	0,8
	Cone	...	...	...	...	...
	Raiz Grossa	1,5	0,1	0,7	0,8	0,2
	Raiz Pivotante	1,2	0,1	0,6	0,9	0,3
	Raiz Total	2,7	0,2	1,3	1,8	0,5
	Serap. Pouco Decomposta	53,7	3,1	14,7	20,9	7,2
	Serap. Lenhosa	28,9	1,7	4,5	17,4	5,1
	Serap. Muito Decomposta	184,9	9,5	17,5	150,2	25,0
CL3	Lenho	1,0	0,1	0,5	0,4	0,3
	Casca	2,9	0,2	0,5	0,6	0,5
	Galho Grosso	1,7	0,1	0,6	0,8	0,6
	Galho Fino	2,7	0,2	0,7	0,8	0,7
	Acícula	16,3	1,3	3,4	0,9	1,1
	Cone	3,3	0,2	1,2	0,5	0,5
	Raiz Grossa	3,0	0,1	0,5	0,4	0,3
	Raiz Pivotante	1,2	0,1	0,7	0,5	0,5
	Raiz Total	4,2	0,2	1,2	0,9	0,8
	Serap. Pouco Decomposta	77,9	6,2	8,6	20,3	6,2
	Serap. Lenhosa	25,9	1,1	2,0	5,4	3,0
	Serap. Muito Decomposta	938,4	51,6	31,2	46,9	15,6

ANEXO A - Concentração de nutrientes por compartimento

(continuação)

Solo	Compartimento	N	P	K	Ca	Mg
CB4	Lenho	1,1	0,0	0,4	0,7	0,2
	Casca	3,5	0,2	0,9	2,9	0,7
	Galho Grosso	1,3	0,1	0,5	0,9	0,3
	Galho Fino	3,4	0,3	1,2	2,6	0,7
	Acícula	14,9	0,9	4,1	4,1	1,1
	Cone	...	...	...	...	...
	Raiz Grossa	2,0	0,1	1,1	1,5	0,6
	Raiz Pivotante	1,3	0,1	0,9	1,4	0,4
	Raiz Total	3,3	0,2	2,0	2,9	1,0
	Serap. Pouco Decomposta	87,5	4,5	22,4	39,2	11,3
	Serap. Lenhosa	17,0	1,1	2,4	10,3	2,4
	Serap. Muito Decomposta	116,0	8,0	13,1	69,6	11,8
LE5	Lenho	1,1	0,0	0,3	0,2	0,1
	Casca	3,2	0,4	1,3	0,9	0,7
	Galho Grosso	1,7	0,1	0,8	0,7	0,5
	Galho Fino	3,1	0,3	1,5	1,2	1,0
	Acícula	14,7	1,0	3,1	1,6	0,6
	Cone	3,6	0,4	1,4	0,5	0,5
	Raiz Grossa	2,7	0,1	0,7	0,5	0,5
	Raiz Pivotante	1,3	0,1	0,6	0,6	0,4
	Raiz Total	4,1	0,2	1,3	1,1	0,9
	Serap. Pouco Decomposta	73,8	5,3	10,5	33,6	7,7
	Serap. Lenhosa	24,7	1,2	1,8	8,7	3,6
	Serap. Muito Decomposta	385,6	25,5	18,9	41,0	12,6
PA6	Lenho	1,3	0,1	0,3	0,4	0,1
	Casca	2,9	0,2	0,7	2,0	0,5
	Galho Grosso	1,6	0,1	0,2	1,0	0,3
	Galho Fino	3,9	0,3	0,7	1,9	0,5
	Acícula	13,4	0,9	3,3	2,8	0,8
	Cone	...	...	...	...	...
	Raiz Grossa	3,2	0,1	0,9	1,1	0,4
	Raiz Pivotante	1,5	0,1	0,5	0,8	0,2
	Raiz Total	4,8	0,2	1,4	1,8	0,6
	Serap. Pouco Decomposta	65,1	4,8	14,2	21,2	6,2
	Serap. Lenhosa	34,3	2,0	5,6	20,1	6,1
	Serap. Muito Decomposta	853,2	44,9	73,0	524,3	100,8

ANEXO A - Concentração de nutrientes por compartimento

(conclusão)

Solo	Compartimento	N	P	K	Ca	Mg
PV7	Lenho	0,9	0,1	0,4	0,6	0,2
	Casca	2,5	0,2	1,1	1,6	0,6
	Galho Grosso	1,1	0,1	0,5	1,2	0,3
	Galho Fino	2,7	0,2	1,2	1,8	0,6
	Acícula	12,3	0,9	3,6	2,7	0,8
	Cone	...	...	...	...	...
	Raiz Grossa	1,8	0,1	1,2	1,0	0,4
	Raiz Pivotante	1,0	0,1	0,8	0,9	0,3
	Raiz Total	2,8	0,2	2,0	1,9	0,7
	Serap. Pouco Decomposta	68,4	3,7	19,9	40,9	8,6
	Serap. Lenhosa	25,3	1,2	1,9	12,9	2,1
	Serap. Muito Decomposta	167,7	6,2	12,8	32,2	7,5
	CH8	Lenho	1,0	0,1	0,5	0,7	0,1
Casca		2,7	0,3	0,9	0,8	0,2
Galho Grosso		1,6	0,2	0,7	0,9	0,3
Galho Fino		3,1	0,3	1,2	1,9	0,4
Acícula		13,8	1,1	4,2	2,4	0,5
Cone		...	...	...	...	...
Raiz Grossa		2,5	0,2	0,9	1,1	0,3
Raiz Pivotante		1,4	0,1	0,8	0,8	0,2
Raiz Total		3,9	0,3	1,8	1,9	0,4
Serap. Pouco Decomposta		108,3	7,7	20,0	33,0	6,4
Serap. Lenhosa		36,7	2,2	1,9	13,9	2,1
Serap. Muito Decomposta		202,2	12,8	15,1	46,8	9,0

Nota: Sinal convencional utilizado:

... Dado numérico não disponível