

Avaliação da sensibilidade de abordagens estatísticas para análise de inventários florestais no processo de fiscalização ambiental

Evaluation of the sensitivity of statistical approaches for the analysis of forest inventories in the environmental inspection process

Vitor Hugo dos Santos Simplicio
UFVJM, Brasil

<https://orcid.org/0009-0006-1306-8559>
vitor.simplicio@ufvjm.edu.br

Eric Bastos Gorgens
UFVJM, Brasil

<https://orcid.org/0000-0003-2517-0279>
eric.gorgens@ufvjm.edu.br

Resumo

A fiscalização eficaz de inventários florestais depende não apenas da auditoria em campo, mas também da capacidade do órgão de identificar corretamente os desvios nos dados, tornando essencial a escolha das abordagens estatísticas apropriadas. Este trabalho avaliou a sensibilidade de duas abordagens para análise de inventários florestais, visando determinar a diferença no diâmetro necessária para resultar na reprovação do inventário pelo órgão ambiental. Foram utilizados três diferentes tipos de inventários amostrais: floresta nativa, empreendimento linear e em floresta plantada. Para a conferência foram escolhidas aleatoriamente 10% das parcelas, garantindo um mínimo de 3 parcelas selecionadas. Foi utilizado o teste *t* pareado para a comparação entre médias ao nível de árvore. O teste de aderência foi realizado pelo teste Kolmogorov-Smirnov (KS). Para identificar a partir de qual momento os testes passariam a indicar diferenças significativas entre os inventários, foi adicionado um desvio de forma crescente ao conjunto de dados da conferência simulada. Não foi constatada sensibilidade significativa para o erro amostral dos inventários protocolados. No entanto, diferenças médias no diâmetro de 0,1 cm já implicou em resultados significativos no teste *t*. Já o teste Kolmogorov-Smirnov apresentou sensibilidade para diferenças médias a partir de 0,5 cm.

Palavras-chave: auditoria florestal, desvios de medição, erro amostral.

Abstract

Effective forest inventory auditing depends not only on field audits but also on the ability of the agency to correctly identify deviations in the data, making the choice of appropriate statistical approaches essential. This study assessed the sensibility of two approaches for forest inventory analysis, aiming to determine the required deviation in diameter that results in rejection by the environmental agency. Three types of sample inventories were used: native forest, linear projects, and forest plantation. For the audit, 10% of the plots were randomly selected, ensuring a minimum

of 3 selected plots. The paired t-test was used to compare means at the tree level. The adherence test was conducted using the Kolmogorov-Smirnov (KS) test. To identify when the tests would start indicating significant differences between inventories, a gradually increasing deviation was added to the simulated checked data. No significant sensibility was found for sampling error considering the analyzed deviation. However, the t-test pointed significant differences for mean deviation greater or equal to 0.1 cm for diameter, while the Kolmogorov-Smirnov test shows significant differences starting at 0.5 cm for the same comparison.

Keywords: audit forest, measurement deviations, sampling error.

1. Introdução

O Brasil possui uma das legislações ambientais mais completas do mundo (Chiavari e Lopes, 2017). A Constituição Federal de 1988 estabeleceu regras de competência comuns e concorrentes em relação ao meio ambiente e entes federativos, em seus artigos 22, 23 e 24 (Brasil, 1988). Como resultado, estados e municípios podem legislar sobre situações mais pontuais, com a cautela de ser subordinada hierarquicamente aos regramentos concorrentes.

A intervenção ambiental é um termo usado na legislação e pode ser definido como qualquer intervenção sobre a cobertura vegetal nativa ou sobre área de uso restrito, ainda que não implique em supressão de vegetação (Minas Gerais, 2019). De forma geral, o processo para solicitação de intervenção ambiental tem como um dos documentos obrigatórios a apresentação de um Inventário Florestal.

Em áreas de floresta nativa, o órgão responsável pela liberação da intervenção ambiental, deve-se atentar a certos procedimentos como a validação do rendimento volumétrico, o levantamento ambiental para identificar áreas de preservação permanente e espécies ameaçadas de extinção (Minas Gerais, 2021). Tal fato sustenta o argumento de que é necessário a fiscalização sobre inventários florestais.

Cada estado brasileiro avançou de forma independente quanto aos procedimentos para fiscalização, conferência e validação destes inventários. No estado de Minas Gerais, por exemplo, o erro de amostragem máximo deve ser de 10% da média do volume para uma probabilidade de 90% de confiança (Minas Gerais, 2013). Há diversos procedimentos que variam de simples conferência de processamento até a remedição de parte das parcelas na busca de se detectar eventuais desvios (Fischer e Traub, 2019). Até recentemente, em Minas Gerais, a análise do inventário florestal deveria ser precedida de vistoria técnica,

durante a qual conferia-se no mínimo 10% das parcelas e no mínimo três parcelas por estrato de amostragem. A vistoria era realizada tendo como acompanhante um representante do empreendimento.

Os dados amostrados, seja no inventário do empreendimento, seja no inventário da conferência, podem ser descritos por uma distribuição de média e desvio padrão determinados. Para a detecção de eventuais desvios de medição ao nível de parcela, são aplicadas análises estatísticas que comparam os dois conjuntos de dados por meio de testes estatísticos, por exemplo, testes de média (teste t pareado ou teste t não pareado) e testes de aderência entre distribuições (teste de Kolmogorov-Smirnov) (Callegari-Jacques, 2009). Já a avaliação do processo de amostragem, analisa a capacidade do delineamento amostral empregado em obter de forma precisa a estimativa do rendimento volumétrico da floresta, buscando eventuais erros amostrais cometidos na execução do inventário.

No entanto, não são usuais procedimentos padronizados na auditoria de inventários florestais, ainda que os órgãos façam essa cobrança, eles não possuem instrumentos adequados para tal implementação (Minas Gerais, 2007). Procedimentos básicos, como a escolha da estatística de comparação até o intervalo máximo entre a medição do empreendimento e a conferência realizada pelo órgão ambiental não são normatizados, variando entre analistas e trazendo insegurança e subjetividade. Tal fato dificulta o entendimento de quais critérios devem ser adotados para se rejeitar ou aprovar determinado inventário, com base nas conferências de campo.

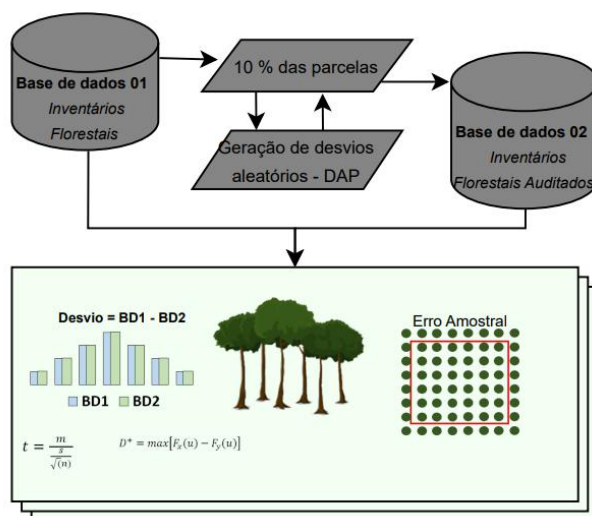
Dessa forma, o objetivo deste trabalho foi avaliar a sensibilidade de duas possíveis abordagens para se analisar inventários florestais durante o processo de fiscalização. Por meio de simulação, deseja-se determinar qual o desvio de medição necessário para fazer com que as estatísticas consideradas indiquem a rejeição do inventário protocolado junto ao órgão ambiental.

2. Material e Métodos

Os três principais inventários amostrais para intervenção ambiental em Minas Gerais foram incluídos nesta análise: (1) em floresta nativa, (2) em empreendimento linear e (3) em floresta plantada. Esses três inventários representam coletas realizadas por um

empreendedor hipotético, e protocolados junto ao órgão ambiental como parte de um pedido de intervenção ambiental. O fluxograma da análise empregada neste trabalho pode ser observado a seguir (Figura 1).

Figura 1. Fluxograma da análise para comparar inventários protocolados e auditados.



Fonte: Elaboração própria.

a. Geração de Desvios de Medição Aleatórios

Para determinar a magnitude do desvio de medição necessário para resultar numa diferença significativa nas duas abordagens de auditoria aqui testadas, foram gerados desvios aleatórios. Os desvios de medição eram sempre inseridos no conjunto de dados auditados, mimetizando uma eventual detecção de diferenças para com os dados protocolados. Os desvios foram gerados de forma aleatória, seguindo uma distribuição normal com diferentes combinações de média e desvio-padrão. Para geração dos valores aleatórios de desvios foram considerados: média variando de 0 a 1,5 cm, em intervalos de 0,1; e desvio-padrão variando de 0,1 a 1,5 cm, em intervalos de 0,1. O processo acima, para cada combinação de média e desvio-padrão, foi repetido 100 vezes, para garantir a aleatoriedade dos desvios. Após a adição dos desvios junto ao DAP, o volume de cada

árvore foi calculado e a abordagem estatística implementada, para avaliar se os desvios incorporados resultavam em diferença estatística. A equação volumétrica utilizada foi a mesma em toda a análise. O volume total com casca das árvores individuais foi estimado pela equação do CETEC (1995) para Cerrado ($R^2=96,4$).

$$VTCC = -0,0393500 + 0,0118579 * DAP - 0,000819184 * DAP^2 + 0,0000413787 * DAP^3 \quad (3)$$

b. Comparação entre Protocolado e Auditado

A primeira abordagem comparou os valores de diâmetro de 10% das parcelas auditadas com os respectivos valores do inventário protocolado. Dois testes estatísticos foram analisados: o teste de médias t para amostras pareadas, e o teste de aderência Kolmogorov-Smirnov (KS).

O teste t é definido pela fórmula:

$$t = \frac{m}{\frac{s}{\sqrt{n}}} \quad (1)$$

em que: m é a média das diferenças entre os dados pareados, n é o tamanho da amostra e S é o desvio padrão das diferenças entre os dados pareados.

O teste de KS é uma comparação de funções de distribuição acumulada, testando para a máxima diferença observada:

$$D^+ = \max[F_x(u) - F_y(u)] \quad (2)$$

em que: $F_x(u)$ e $F_y(u)$ é a distribuição da probabilidade empírica de primeira e segunda ordem, respectivamente. Foi considerado um nível de significância de 10%.

c. Impacto dos Desvios de Medição no Erro Amostral

Na segunda abordagem, analisou-se o impacto do desvio de medição sobre o erro amostral. Para o cálculo do erro amostral, foi considerado que todos os inventários seguiram o delineamento casual simples (Inventário Finito). 10% das parcelas protocoladas

tiveram o desvio de medição detectado pela auditoria propagado sobre seus diâmetros. Então o erro amostral foi computado, considerando um nível de significância de 10%.

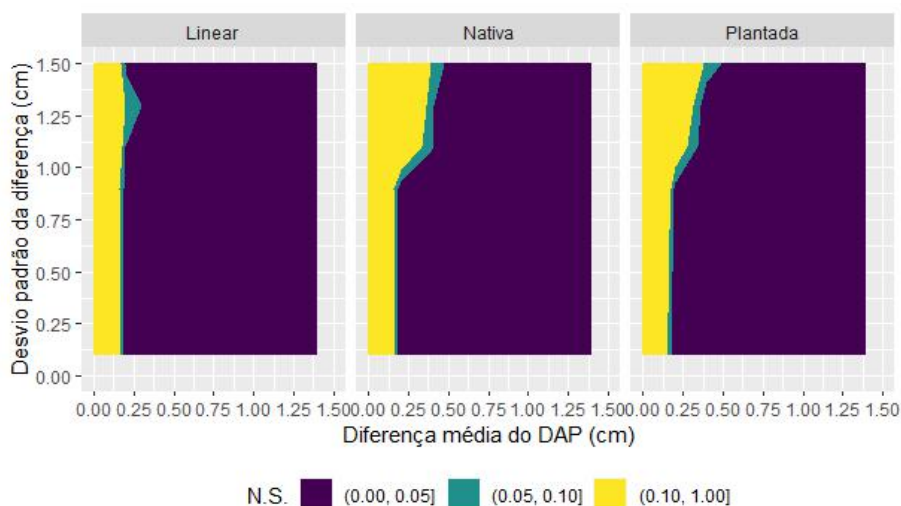
d. Análise de Sensibilidade das Abordagens

Com base nos valores de significância dos testes (i.e. abordagem 1), e nos valores de erro amostral (abordagem 2) superfícies de resposta foram construídas para facilitar a identificação visual dos desvios de medições que resultariam em diferenças significativas. Para facilitar a visualização, os níveis de significância (N.S.) foram representados por três classes: valores entre 0,00 e 0,05 indicando forte significância; valores entre 0,05 e 0,10 indicando uma fraca significância; e valores acima de 0,10 indicando a não significância.

3. Resultados

O Teste t resultou alta sensibilidade, acusando diferença significativa para diferenças médias no diâmetro a partir de 0,10 cm para todos os tipos de empreendimentos analisados. Com exceção de empreendimentos lineares, os desvios-padrão a partir de 0,8 cm passaram a influenciar o teste, ocasionando uma redução na sensibilidade do teste, passando a acusar diferença estatística apenas para desvios de medição superiores a 0,25 cm (Figura 2).

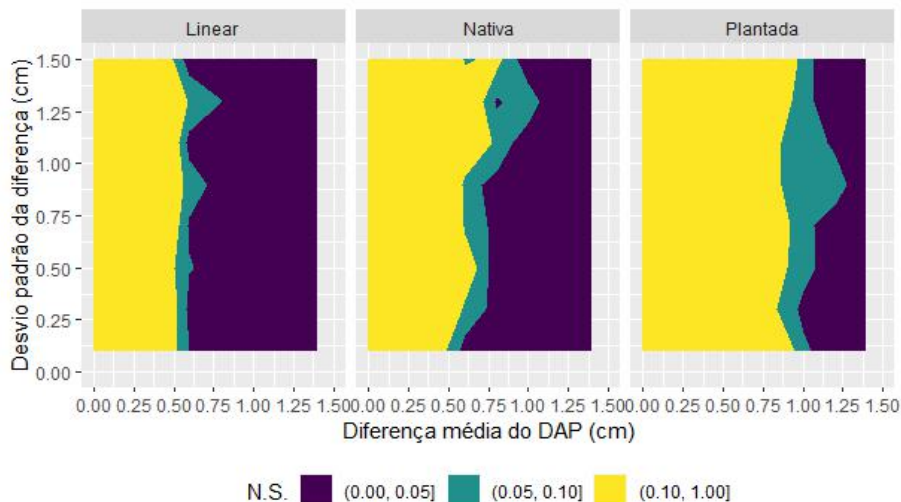
Figura 2. Valor de significância do teste t para diferentes distribuições do desvio de medição do diâmetro.



Fonte: Elaboração própria.

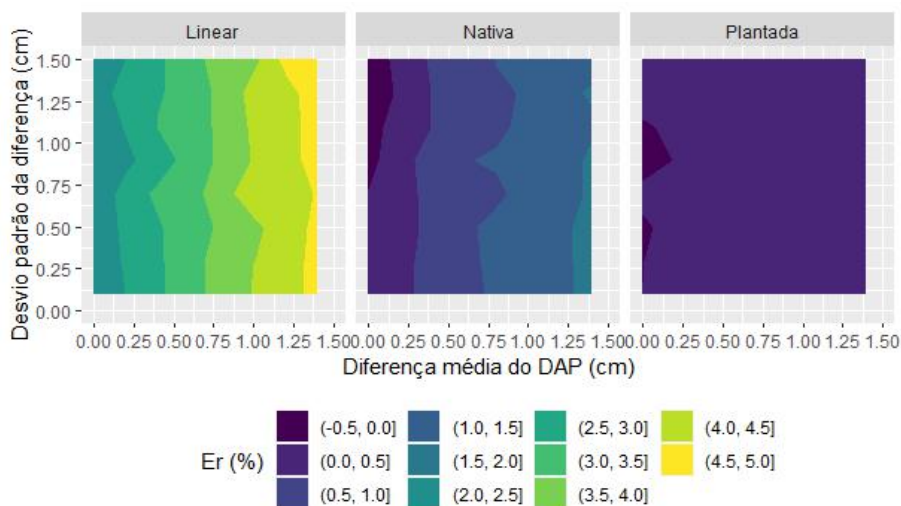
O teste KS apresentou menor sensibilidade tanto para o desvio de medição médio, quanto para o desvio padrão (Figura 3). Desvios de medição médios superiores a 0.50 cm no diâmetro para empreendimentos lineares e florestas nativas apresentaram significância estatística, com leve acréscimo à medida que o desvio padrão aumentou. Já para florestas plantadas, apenas desvios de medição a partir de 1 cm apresentaram diferenças estatísticas. A zona de significância fraca (5% a 10% do nível de significância) foi mais proeminente no teste KS.

Figura 3. Valor de significância do teste Kolmogorov-Smirnov para diferentes distribuições do desvio de medição do diâmetro.



Fonte: Elaboração própria.

As diferentes combinações de média e o desvio padrão para as diferenças de medição, apresentaram impactos variados no erro amostral, de acordo com o tipo de empreendimento (Figura 4). O impacto no erro amostral foi maior para o inventário do empreendimento linear. No entanto, mesmo com desvios de medição de 1.5 cm no diâmetro, o erro amostral não ultrapassou 5%, mantendo-se abaixo do erro máximo permitido em lei (10%). O desvio padrão das diferenças de medição apresentou pouca influência no erro amostral.

Figura 4. Erro amostral considerando os desvios de medição no diâmetro.

Fonte: Elaboração própria.

3. Discussão

A conferência do inventário florestal chegou a ser incluída na rotina de processos autorizativos de áreas de supressão pelo Instituto Estadual de Florestas de Minas Gerais em 2007 (Minas Gerais, 2007). Apenas com o controle em nível de árvore é que torna-se possível o pareamento das medições do empreendimento e da auditoria (abordagem 1). Na ausência do controle de árvore, a comparação deve ser realizada em nível de erro amostral (abordagem 2). Nesse contexto, torna-se relevante a inclusão das duas abordagens neste trabalho.

Dentre as abordagens estatísticas para análise de dois conjuntos de dados, o teste t (pareado ou não pareado) é sem dúvida um dos mais difundidos no meio florestal (Da Silva et al., 2019). Neste estudo, a comparação entre os dados protocolados e auditados mostrou que diferenças médias de medição de 0,1 cm no diâmetro já levaria a diferenças significativas. Isso porque, o teste apresenta alta sensibilidade a sutis diferenças observadas entre amostras, principalmente se tratamento de amostras pareadas (Callegari-Jacques, 2009).

Quando a mesma comparação é feita utilizando um teste de aderência (i.e. Kolmogorov-Smirnov), diferenças significativas foram detectadas para desvios de medição a partir de

0,5 cm. Um teste muito sensível, como é o caso do teste t (Callegari-Jacques, 2009) indica uma pequena diferença de medição do diâmetro como significativo, enquanto o teste de Kolmogorov-Smirnov admite maiores diferenças.

A análise de como as diferenças influenciam no erro amostral, mostram que os desvios na medição diamétrica podem impactar o erro amostral de inventários. Contudo, os desvios aqui testados não foram suficientes para extrapolar o erro amostral de 10% aceito pelo órgão ambiental. A comparação de erros amostrais com os não amostrais em florestas equiâneas mostram que os erros amostrais do inventário não são afetados pelos erros não amostrais. No entanto, os desvios na medição do diâmetro têm efeito significativo na estimativa de volume por hectare quando este ocorre em mais de 30% das árvores da parcela (Kohler, 2017). O erro não amostral só irá impactar diretamente o erro amostral quando observado em grande escala. O estudo acima, reforça a dificuldade em compreender o impacto dos desvios de medição no erro amostral, analisando apenas 10% das parcelas conferidas, como proposto pela metodologia adotada em Minas Gerais.

Na prática, é observado um conflito entre a significância estatística e os desvios auditáveis. A diferença estatística entre medições do inventário protocolado e o auditado pode existir, sem, no entanto, ter relevância sobre o erro amostral dos inventários protocolados, que é o que realmente importa para o órgão ambiental.

Uma questão importante, e de certa forma negligenciada nas auditorias, é que erros não amostrais no inventário podem ser cometidos tanto pelo auditor, quanto pelo empreendimento. O fato é que erros podem ocorrer nos dois lados do processo, e que a detecção apenas indica que existe um desvio entre procedimentos, que pode ser de diferença de equipamento, diferença de técnica, ou outra razão qualquer. A simples detecção de desvios não indica que houve uma detecção de fraude ou de dolo à sociedade.

Erros amostrais são muito mais relevantes do que desvios de medição, uma vez que o objetivo é garantir confiabilidade nas estimativas da população. Alternativa interessante seria que ao invés da conferência de parcelas, o órgão realizasse um inventário paralelo utilizando técnicas de sensoriamento remoto com aeronaves remotamente pilotadas (RPA), ou mesmo, o cruzamento de estimativas volumétricas de inventários próximos (tanto espacialmente, quando temporalmente).

O uso de uma amostragem de área variável, como por exemplo Bitterlich, é uma possibilidade (Campos e Leite, 2017). Muitos autores desenvolveram trabalhos que testam a eficiência e precisão deste método de amostragem em florestas nativas e constataram ser este um método eficiente para se mensurar o volume (Cavalcanti et al., 2011; Retslaff et al., 2014; Téó et al., 2014). Mesmo não sendo muito usual, o método de amostragem por Bitterlich tem a vantagem de ser mais simples e de menor custo do que métodos que exigem alocação de parcela fixa, sendo recomendado principalmente quando há a necessidade de um diagnóstico rápido (Farias et al., 2002).

4. Conclusões

Os resultados demonstraram que desvios de medição na ordem de 0.1 cm já são suficientes para que o teste t apresente resultados significativos, enquanto o Kolmogorov-Smirnov necessita de diferenças um pouco maiores, na ordem de 0.5 cm. Considerando os atuais equipamentos de medição (sutas e fitas) estes valores são bastante baixos, muito próximos das precisões desses equipamentos. Não foram constatados impactos significativos de desvios detectados em 10% dos dados, sobre o erro amostral dos inventários, não sendo suficientes para indicar rejeição dos inventários protocolados. A auditoria de inventários deve buscar identificar principalmente erros de amostragem, e a existência de fraude, e não a presença de desvios de medição.

Referências

Brasil. (1988). Constituição Federal. **Diário Oficial da União**, Brasília, DF.

Callegari-jacques, S. M. (2009). Bioestatística: princípios e aplicações. [S. l.], Artmed. 255 p.

Campos, J. C. C.; Leite, H. G.(2017). Mensuração florestal: perguntas e respostas. [S. l.], UFV. 636 p.

Cavalcanti, F. J. D. B.; Machado, S. D. A.; Osokawa, R. T.; Cunha, U. S. D. (2011). Comparação dos valores estimados por amostragem na caracterização da estrutura de uma

área de floresta na Amazônia com as informações registradas no censo florestal. **Revista Árvore**, [s. l.], 35(5), p. 1061-1068. <https://doi.org/10.1590/S0100-67622011000600012>

Chiavari, J. e Lopes, C. 2017). Forest and land use policies on private lands: An international comparison. **Climate Policy Initiative**, [s. l.], p. 36. <http://119.78.100.173/C666/handle/2XK7JSWQ/242512>

Chiavenato, I. (2003). Introdução à teoria geral da administração. [S. l.], Elsevier Brasil. 634 p.

Cetec – Fundação Centro Tecnológico de Minas Gerais.(1995). Determinação de equações volumétricas aplicáveis ao manejo sustentado de florestas nativas no Estado de Minas Gerais e outras regiões do país. **Relatório Final**. Belo Horizonte. <http://www.bibliotecadigital.mg.gov.br/consulta/consultaDetalheDocumento.php?iCodDocumento=72776>

Da Silva, S. A.; Nakajima, N. Y.; Dalla Corte, A. P.; Arce, J. E.; Rodrigues, A. L. (2019). Ferramentas estatísticas para auditoria de inventários florestais em povoamentos de *Eucalyptus* spp. Statistic tools for forest inventory auditing in *Eucalyptus* spp. stands. **Scientia Forestalis**, 47(121), p. 59-70. Piracicaba. <http://dx.doi.org/10.18671/scifor.v47n121.06>.

Farias, C. A. D.; Soares, C. P. B.; Souza, A. L. D.; Leite, H. G. (2002). Comparação de métodos de amostragem para análise estrutural de florestas inequidâneas. **Revista Árvore**, [s. l.], 26(5), p. 541-548. <https://doi.org/10.1590/S0100-67622002000500003>

Fischer, C. e Traub, B. (2019). Swiss national forest inventory: methods and models of the second assessment. Springer, Berlim/Heidelberg, Alemanha.

Kohler, S. V. (2017). Erros amostrais e não amostrais em inventários de florestas plantadas. Tese de Doutorado em Engenharia Florestal. Universidade Federal do Paraná.

Minas Gerais. (2019). Decreto nº 47.749, de 11 de novembro de 2019. Dispõe sobre os processos de autorização para intervenção ambiental e sobre a produção florestal no âmbito do Estado de Minas Gerais e dá outras providências. **Diário Oficial do Estado Minas Gerais**, Belo Horizonte, MG.

Minas Gerais. (2007). Portaria nº 172, de 28 de novembro de 2007. Dispõe sobre as estimativas volumétricas de material lenhoso em processos autorizativos em áreas onde houver a supressão para o uso alternativo do solo. **Diário Oficial do Estado Minas Gerais**, Belo Horizonte, MG.

Minas Gerais. (2013). Resolução conjunta SEMAD/IEF nº 1905, de 12 de agosto de 2013. Dispõe sobre os processos de autorização para intervenção ambiental no âmbito do Estado de Minas Gerais e dar outras providências. **Diário Oficial do Estado Minas Gerais**, Belo Horizonte, MG.

Minas Gerais. (2021). Resolução conjunta SEMAD/IEF Nº 3.102, de 26 de outubro de 2021. Dispõe sobre os processos de autorização para intervenção ambiental no âmbito do Estado de Minas Gerais e dá outras providências. **Diário Oficial do Estado Minas Gerais**, Belo Horizonte, MG.

Retslaff, F. A. S.; Dalla Lana, M.; Doubrawa, B.; Figueiredo Filho, A.; Netto, S. P. (2014). Amostragem em conglomerados pelo método de Bitterlich em floresta ombrófila mista. **Nativa**, 2(4), p. 194-198. Sinop, MT. <http://10.14583/2318-7670.v02n04a02>.

Téo, S. J.; Schneider, C. R.; Fiorentin, L. D.; Da Costa, R. H. (2014). Comparação de métodos de amostragem em fragmentos de floresta ombrófila mista em Lebon Régis, SC. **Floresta**, 44(3), p. 393-402. Curitiba, PR. <http://dx.doi.org/10.5380/rf.v44i3.32687>