

Determinación de la intensidad de muestreo en inventario forestal continuo en un bosque tropical lluvioso denso, Amazonia Oriental, Brasil

Sampling intensity determination for continuous forest inventory, dense ombrophilous forest, Eastern Amazon, Brazil

Luiz Marcos Silva-Matos¹ • Agostinho Lopes-de-Souza² • Daniel Henrique Breda-Binoti² • Elpidio Inácio Fernandes-Filho³ • Andreina Epifanía Dávila-Vega⁴ • Duberlí Geomar Elera-González⁴ • Ana Carolina de Albuquerque-Santos⁴ • Perez Alves-Corrêa⁵ • Katia Regina-Silva⁵

Abstract

The optimized sampling in forest inventories allows improving technologies of sustainable forest management. It was developed a methodology to determine the optimum sampling intensity for continuous forest inventories in order to meet the requirement of the Principle 08 of the Forest Stewardship Council (FSC). We used a census data, where trees equal or greater than 35 cm of dbh were measured and mapped. A cutting plan simulator that combines a genetic algorithm and a Geographic Information System (GIS) was developed. Ten plans were simulated, five with a cutting intensity of 22 m³ ha⁻¹ and other five with cutting intensity of 30 m³ ha⁻¹. The effective area of logging was divided into 4 690 plots. During the genetic algorithm implementation, two approaches (A and B) were considered. Approach A aimed to maximize the number of sampled species, based on pre-defined sampling intensities of 1:1 000, 1:750, 1:500, 1:250 and 1:200. Approach B, in turn, aimed to minimize the number of permanent plots to sample all harvested species. It was not possible to sample all harvested species using pre-defined sampling intensities. To meet the requirements of FSC 8th Principle, the methodology determined an optimum sampling intensity of 1:180 and 1:165 for cutting intensities of 22 m³ ha⁻¹ and 30 m³ ha⁻¹, respectively. There were no significant differences between the numbers of harvested species in the both cutting intensities.

Key words: Genetic algorithm, optimization, FSC forest certification, forest monitoring.

1. Faculdade de Engenharia de Agrimensura da Bahia, Instituto de Qualificação Profissional; Brasil; luizmarcos.matos@gmail.com

2. Departamento de Engenharia Florestal, Universidade Federal de Viçosa; Minas Gerais, Brasil; alsouzaal@gmail.com; danielhbbinoti@gmail.com

3. Departamento de Solos, Universidade Federal de Viçosa; Minas Gerais, Brasil; elpidiofilho@gmail.com

4. Departamento de Engenharia Florestal, Universidade Federal de Viçosa; Minas Gerais, Brasil; aepifania16@gmail.com; duberelela@gmail.com; anaflorestaufv@gmail.com

5. Orsa Florestal S.A. São Paulo, Brasil. pacorrea@orsaflorestal.com.br; silva.kr@gmail.com

Recibido: 23/11/2017

Aceptado: 22/05/2018

Publicado: 28/06/2018

DOI: 10.18845/rfmk.v15i37.3601

Resumen

El muestreo optimizado en inventarios forestales permite perfeccionar las tecnologías de manejo forestal sostenible. Se desarrolló una metodología para determinar la intensidad óptima de muestreo en inventarios forestales continuos, ajustándolos al principio n° 08 del FSC (Forest Stewardship Council). Datos de un censo con mapeo de árboles con DAP ≥ 35 cm fueron utilizados. Un simulador de plan de corte que combina un algoritmo genético y un Sistema de Información Geográfica (GIS) fue desarrollado. Diez planes de corte fueron simulados, cinco con intensidad de $22 \text{ m}^3 \text{ ha}^{-1}$ y cinco con $30 \text{ m}^3 \text{ ha}^{-1}$. El área efectiva de explotación forestal fue dividida en 4 690 parcelas (100×100 m), en las cuales fueron asignados los árboles mapeados en el censo. En la preparación del algoritmo genético dos enfoques (A y B) fueron considerados. El enfoque A buscó maximizar el número de especies muestreadas con base en las intensidades de muestreo predefinidas 1:1 000, 1:750, 1:500, 1:250 y 1:200. El enfoque B buscó minimizar el número de parcelas permanentes para muestrear todas las especies cosechadas. No fue posible muestrear todas las especies cosechadas utilizando intensidades de muestreo pre-definidas. Para cumplir con el Principio n° 08 del FSC, la metodología determinó una intensidad óptima de muestreo de 1:180 y 1:165 para las intensidades de corte de $22 \text{ m}^3 \text{ ha}^{-1}$ y $30 \text{ m}^3 \text{ ha}^{-1}$ respectivamente. No hubo diferencia significativa entre el número de especies cosechadas en las diferentes intensidades de corte.

Palabras clave: Algoritmo genético, optimización, certificación FSC, monitoreo forestal.

Introducción

Los bosques tropicales del mundo a menudo están siendo explotados para la producción de madera o están en proceso de conversión a otros usos económicos de la tierra (Alder & Synnott, 1992). La Amazonia brasileña, con 325 469 969 ha de bosques naturales, 84 749 millones m^3 de madera total y 88 526 millones de toneladas de biomasa total, es la principal región productora de madera de bosques nativos del mundo (SFB, 2013). En 2012 fueron comercializados legalmente, 12,9 millones de m^3 de madera en trozas, equivalente a 5,9 millones de m^3 de madera aserrada, que generaron alrededor de US\$ 2,6 billones (SFB, 2013; Veríssimo & Pereira, 2015). Sin embargo, un análisis de los Documentos de Origen Forestal (DOF), realizado en base al sistema DOF, en el período 2007-2010, mostró que sólo el 49 % de la madera provino de manejo forestal sostenible (MFS) y 51 % de deforestación autorizada (SFB, 2013). El MFS

tiene posibilidad de desarrollarse con el respaldo y disponibilidad de datos extensos sobre el bosque (Alder & Synnott, 1992), la explotación sostenible del bosque es más rentable que las actividades agropecuarias, las cuales, para ser implementadas, requieren la eliminación del bosque (Santana, Santos, Santana, & Gazel Yared, 2012). El MFS es una forma de uso legal de la tierra; en Brasil, la Ley 12 651 del 25 de mayo de 2012, determina que sean mantenidos como reserva legal, por lo menos el 80 % de la propiedad rural situada en una zona forestal de la Amazonia brasileña y admite la explotación económica de la vegetación natural sólo a través de plan de manejo forestal sostenible (PMFS) previamente aprobado por el órgano competente del Sistema Nacional del Medio Ambiente - SISNAMA (BRASIL, 2012).

En los últimos años surgió la certificación forestal (FSC, 2002), como un instrumento económico y de protección ambiental que tiene como objetivo certificar la calidad ambiental de los PMFS, se basa en indicadores (ajustar), criterios (atender) y principios (cumplir). El principio 08 establece los monitoreos mínimos que la certificación requiere (Verjans, 2012) y el criterio 8.2 menciona que las actividades de manejo deben incluir los datos necesarios para conocer y monitorear el rendimiento de todos los productos forestales cosechados (FSC, 2002; Verjans, 2012). El inventario forestal es el procedimiento para obtener información útil para la toma de decisiones sobre el manejo, aprovechamiento y monitoreo del bosque (Ortiz & Quirós, 2002). Este, puede realizarse a través del establecimiento de parcelas permanentes de muestreo, las cuales brindan información dinámica sobre los cambios en el stock y crecimiento (Alder & Synnott, 1992; Camacho, 2000).

Las estrategias de muestreo basadas en sólidos principios estadísticos están bien desarrolladas y están disponibles para los usuarios (Schreuder, Gregoire, & Wood, 1993), esta amplia base de conocimiento nos desafía a desarrollar nuevas y más eficientes formas de organizar, procesar y analizar el conocimiento de los recursos naturales (Rykiel, 1989). En ese contexto, la inteligencia artificial proporciona herramientas y técnicas computarizadas robustas que contribuyen a la gestión y manejo de recursos naturales (Alcântara, 2015; Chen, Jakeman, & Norton, 2008; Coulson, Folse, & Loh, 1987; Ducheyne, De Wulf, & De Baets, 2004; Peng & Wen, 1999; Rykiel, 1989). Los Algoritmos Genéticos (AG) son métodos adaptativos que pueden usarse para resolver problemas complejos de búsqueda numérica, optimización de funciones, aprendizaje de máquinas, fenómenos ecológicos, investigación de operaciones, entre otras aplicaciones (García, García, & Friedmann, 2000; Rebello & Hamacher, 2000; Tomppo, 2006). Estos, fueron usados por primera vez por Holland (1975), al

desarrollar una técnica de búsqueda basada en la teoría de la evolución de Darwin y en el proceso genético de los organismos vivos. Los elementos y operadores de los AG provienen de la biología, el vector de solución candidato se denomina cromosoma y un grupo de cromosomas se denomina población, una población es una generación (Goldberg & Luna, 2000; Tomppo, 2006). Los AG trabajan con una población de soluciones iniciales, que a través de diversas operaciones van evolucionando hasta llegar a una solución que mejor atienda algún criterio específico de evaluación (Mitchell, 1998). En cada generación los cromosomas son evaluados de acuerdo a una función que mide la aptitud (función fitness), los cromosomas con mejor fitness son cruzados o mutados para dar origen a la próxima generación, de esa manera cada generación o conjunto de soluciones irá mejorando, hasta llegar a una solución que cumpla la función objetivo (Holland & Goldberg, 1989). Valiéndose de esta técnica, Santacruz Delgado (2010) utilizó AG para diseñar redes de muestreo óptimas para monitorear carbono orgánico en el suelo, Quintero et al. (2011) utilizaron AG para resolver un modelo de planificación del aprovechamiento de plantaciones forestales obteniendo una efectividad del 91 %. Entre otras investigaciones que utilizan AG aplicados en el sector forestal destacan las desarrolladas por Tomppo and Halme (2004), Guvenir and Erel (1998), Eskelson et al. (2009) y Ducheyne et al. (2006). Todo eso justifica la realización de estudios para perfeccionar tecnologías de manejo forestal sostenible y consolidar su aplicación práctica.

El objetivo de este estudio fue desarrollar una metodología para determinar la intensidad de muestreo de parcelas permanentes que cumpla las exigencias del Principio n° 08 del FSC (FSC, 2002), de la NT/IBAMA 01/07 y del Manual Técnico para la instalación y medición de parcelas permanentes (MMA, 2004).

Material y Métodos

Caracterización del área de estudio

Datos de un censo o cartografía censal de árboles con DAP ≥ 35 cm fueron utilizados, provenientes de la unidad de producción anual 2 (UPA-02) del área de manejo forestal (AMF) de Orsa Florestal SA, perteneciente a la empresa Jari Celulose SA, cedidos por convenio a la Universidad Federal de Viçosa – UFV. La AMF de la Orsa Florestal suma aproximadamente 545 mil hectáreas y está ubicado en Monte Dourado, en el municipio de Almeirim, PA, Brasil (00°27'00" a 01°30'00" S y 51°40'00" a 53°20'00" O), y la UPA-02 posee una superficie manejada de 4 690 ha.

Los suelos son Latosoles Amarillos y el relieve es plano, con inclinación máxima de hasta un 10 %. El clima en la región se caracteriza por dos estaciones muy distintas: una lluviosa, de enero a julio, y otra seca, de agosto a diciembre. Según la clasificación de Köppen, el clima es del subtipo Amw', caliente, húmedo y el más frío de esa categoría. La temperatura se mantiene estable durante todo el año, el promedio mensual es de 25,5 a 27,4 °C. En la UPA-02 predomina el tipo de bosque primario denso lluvioso (Veloso, Rangel Filho, & Lima, 1991), perenne siempre verde, sin marcada estacionalidad, estos tipos de bosque se caracterizan por la presencia de fanerófitos, meso y macrofanerófitos con aproximadamente 500 árboles ha⁻¹ y DAP > 10 cm, alcanzando hasta 40 m² ha⁻¹ y 500 m³ ha⁻¹ (Pires, 1974). La precipitación media anual de la región es de 2 115 mm. Los totales mensuales tienden a aumentar durante el verano y llegan a su punto máximo en otoño. Los meses de marzo, abril y mayo reciben alrededor del 40 % del total anual de lluvias. Durante el invierno las precipitaciones mensuales disminuyen progresivamente, alcanzando el mínimo durante la primavera. Los meses de septiembre a noviembre totalizan apenas el 8 % del volumen anual de lluvias (Pires, 1991).

Recolección de datos

Para obtener el volumen de madera por especie y área, la relación de las especies existentes, el número de árboles, calidad de la madera y la ubicación de los árboles, se llevó a cabo en 2006, el censo con mapeo de árboles con DAP ≥ 35 cm. El AMF se subdividió en UPAs, y éstas, en unidades de trabajo (UT). El número de UTs varía según el tamaño de la UPA. Las UTs cuentan con 10 ha cada una, 250 m en dirección norte-sur y 400 m en dirección este-oeste. Para facilitar la operatividad del censo con mapeo, la UT fue subdividida en ocho franjas de 250 m x 50 m (1,25 ha) cada una.

El censo consistió en la ubicación, identificación y evaluación de los árboles de valor comercial, árboles semilleros, árboles con valor potencial para cortes futuros y árboles no comerciales. Los datos se introdujeron manualmente en un formulario de campo o fueron digitados en el colector de datos que tiene un programa específico para el Plan de Manejo Forestal Sostenible (PMFS), y todas las informaciones fueron utilizadas en la planificación de la infraestructura de la explotación. El modelo para el PMFS de la Orsa Florestal contiene información tal como el número de árboles, coordenadas de ubicación de cada árbol, identificación botánica de las especies, diámetro a 1,30 m de altura (DAP), altura comercial y calidad del fuste, para los árboles con DAP ≥ 35 cm.

El volumen comercial por árbol fue estimado mediante el uso de la ecuación 1 (Souza et al., 2014).

$$Vc = 7,85398 * 10^{-5} * DAP^2 * Hc * Fa_i * Ff \quad (1)$$

Donde:

Vc es el volumen de madera comercial (en m^3).

DAP es el diámetro a la altura del pecho (en cm).

Hc es la altura comercial (en m).

Fa_i es el factor de utilización del tronco ($Fa_1 = 1,0$; $Fa_2 = 0,7$; $Fa_3 = 0,3$).

F_f es el factor de forma de la troza, igual a 0,7.

Elaboración del plan de corte (PC)

Después del censo con mapeo de árboles y de acuerdo a la IN/MMA 05/2006 y la RESOLUÇÃO/CONAMA 406/2009, fue desarrollado el sistema para la elaboración del PC utilizando el entorno de programación “Visual Basic for Applications” en conjunto con Microsoft Excel 2010.

El art. 8° de la IN/MMA 05/2006 aborda la planificación de la explotación, estableciendo en los incisos I y II las siguientes restricciones (Rj): **R1** – mantenimiento de por lo menos 10 % del número de árboles por especie, en el área efectiva de explotación de la UPA, que cumplan con los criterios de selección para corte indicado en el PMFS, respetando el límite de mantener en pie tres árboles por especie por cada 100 ha; **R2** – mantenimiento de todos los árboles de las especies, cuya abundancia de individuos con DAP superior al diámetro mínimo de corte (DMC) sea igual o menor a tres árboles por cada 100 ha de superficie efectivamente explotada en la UPA; **R3** – el inciso 2 del art. 7° de la IN/MMA 05/2006 establece el $DMC \geq 50$ cm; y **R4** – el inciso I del art. 5° establece la intensidad de corte (IC) máxima de $30 m^3 ha^{-1}$ para PMFS Pleno con un ciclo de corte inicial de 35 años.

Una vez obtenida la base de datos del censo con mapeo de árboles, se elaboró la rutina de programación, como se describe a continuación. En primer lugar, fueron aleatorizados los árboles de la base de datos para que la secuencia de cortes quedara discontinua. En este paso, el listado fue mezclado, es decir, el orden de la base de datos se modificó para eliminar el efecto de la dirección de recorrido. Después de la clasificación de árboles por especie, se determinó el número de individuos y el área basal por especie y por hectárea, identificándose los árboles factibles de explotación dentro del intervalo de diámetro mínimo (D_{min}) y diámetro máximo (D_{max}).

A continuación, se estableció el D_{min} de 50 cm (R3) y D_{max} de 140 cm. De esa manera, los árboles protegidos por las restricciones fueron seleccionados al azar y cumpliendo la R1 y R2. Se sumó el volumen de los árboles seleccionados para corte, y éstos fueron cosechados aleatoriamente hasta alcanzar el volumen máximo por hectárea, cumpliendo la R4.

Finalmente, se reordenó la base de datos de acuerdo con la secuencia original, para presentar los resultados. Después del desarrollo del sistema, fueron simulados cinco PC combinados con las IC de $30 m^3 ha^{-1}$ (IN/MMA 05/2006 y RESOLUÇÃO/CONAMA 406/2009) y $22 m^3 ha^{-1}$ (Pereira, 2012).

Análisis de datos

Tras la preparación de los PC, se identificaron las especies potenciales para ser cosechadas. A continuación, teniendo la base de datos y el polígono georreferenciado de la UPA-02, el área fue dividida en parcelas de 100×100 m, totalizando 4 690 parcelas, y cada individuo fue identificado en su respectiva parcela. Este procedimiento se realizó utilizando el software ArcGIS 10.1. Después de la identificación de los individuos remanentes en las respectivas parcelas, fue desarrollado el algoritmo genético.

Además, se comparó la intensidad de muestreo de parcelas permanentes, que incluye todas las especies listadas en el PC con intensidad de muestreo para el volumen de los árboles con $DAP \geq 35$ cm suficientes para cumplir con lo establecido en la NT/IBAMA 01/07, lo que limita el error de muestreo a 10 %, con 95 % de probabilidad (Cavalcanti, Machado, & Hosokawa, 2009; Péllico Neto & Brena, 1997).

Algoritmo genético

El algoritmo genético fue implementado en el entorno de programación “Visual Basic for Applications” en conjunción con Microsoft Excel 2010. Las pruebas con el algoritmo se realizaron en un microcomputador “Core i5”, con memoria RAM de 8 Gb.

Las soluciones (individuos) generadas tienen formato de vector $V(x) = \{X_1, X_2, \dots, X_i\}$, donde la variable de decisión X_i ($X_i \in \{0,1\}$) simboliza la i -ésima unidad de muestreo, para $i = 1, 2, \dots, m$. Si la parcela es generada, el valor de la variable de decisión recibe 1; de lo contrario, 0. Fueron utilizados dos enfoques de implementación del algoritmo genético. El enfoque A consideró la maximización del número de especies muestreadas, teniendo en cuenta las intensidades de muestreo preestablecidas de 1:1 000; 1:750; 1:500; 1:250 y 1:200; por otro lado, el enfoque B analizó la intensidad mínima de muestreo necesaria para cumplir la exigencia de la certificación forestal (FSC, 2002), es decir, muestrear todas las especies del PC.

Cuadro 1. Resultados de los planes de corte (PC) para las intensidades de corte (IC) de 22 m³ ha⁻¹ y 30 m³ ha⁻¹, para la UPA-02 con área total de 4690 ha. NE = número de especies; N = número de árboles; G = área basal total, en m², en 4690 ha. y VT = volumen total, en m³, en 4690 ha.

Table 1. Results of the cutting plans (PC) for the cutting intensities (IC) of 22 m³ ha⁻¹ and 30 m³ ha⁻¹ for UPA-02 with a total area of 4690 ha. In which: NE = number of species; N = number of trees; G = total basal area, in m², in 4690 ha; VT = total volume, in m³, in 4690 ha.

PC	IC = 22 m ³ ha ⁻¹				IC = 30 m ³ ha ⁻¹			
	NE	N	G	VT	NE	N	G	VT
1	139	47 343	13 608	103 178	140	64 555	18 561	140 699
2	139	47 351	13 613	103 176	141	64 502	18 557	140 699
3	140	47 496	13 608	103 180	141	64 633	18 553	140 700
4	140	47 456	13 616	103 179	140	64 534	18 543	140 699
5	141	47 382	13 609	103 173	142	64 531	18 556	140 699

De acuerdo con MMA (2004) y Silva et al. (2005), para áreas mayores a 1000 ha, la intensidad de muestreo ideal es de una parcela permanente por cada 250 ha, distribuidas aleatoriamente en las áreas productivas del bosque. Los individuos generados en la simulación cumplían las exigencias de las intensidades de muestreo predefinidas. La función de desempeño del algoritmo genético fue definida por la ecuación 2.

$$Max. fitness = \sum_{i=1}^m c_i x_i \quad (2)$$

Donde:

c_i es el número de especies muestreadas con la generación de la i -ésima parcela.

x_i es la i -ésima parcela o unidad de muestreo

La población inicial fue constituida de 100 individuos generados al azar, y los operadores genéticos utilizados fueron la mutación y el "crossover". El "crossover" es el principal proceso de búsqueda del algoritmo: dos padres (soluciones elegidas dentro de la población) cuando son seleccionados para cruzamiento, producen dos nuevos individuos. Se utilizó el crossover de múltiples puntos, donde los nuevos individuos son generados por fragmentos de diferentes puntos de la secuencia binaria que constituyen sus padres. La mutación tiene como función asegurar que, si la población se estabiliza en un máximo local, puede desplazarse a un punto máximo global. En la mutación, los genes o individuos aleatorios en la población poseen sus valores modificados al azar. Se utilizó como mutación una tasa del 0,6 % de cada individuo de la población.

La elección de los individuos que continuarán en la población o que serán seleccionados para reproducir, depende del método de selección empleado. Se utilizó el método de la ruleta rusa, donde, después del cálculo del "fitness", los individuos tienen diferentes posibilidades para la selección en función de sus desempeños. Como criterio de parada del algoritmo, fue utilizado la evolución de 100 generaciones y cada algoritmo fue ejecutado 10 veces.

La función de desempeño del algoritmo genético se fundamentó en la aplicación de penalidades a la función objetivo, que consiste en minimizar el número de parcelas permanentes muestreadas. Las penalidades impuestas se refieren al número de especies muestreadas. La función de "fitness" se presenta a ecuación 3.

$$Min. fitness = \sum_{i=1}^m c_i x_i - (N - \sum_{i=1}^m E_i x_i)^2 \quad (3)$$

Donde:

N es el número total de especies

E_i es el número de especies muestreadas con la generación de la i -ésima parcela.

Como criterio de parada del algoritmo, se utilizaron 50 000 iteraciones; cada algoritmo fue ejecutado cinco veces.

Resultados

Fueron observadas en promedio, 140 y 141 especies factibles de corte, respectivamente, en las ICs de 22 m³ ha⁻¹ y 30 m³ ha⁻¹ (Cuadro 1). Los resultados del enfoque

Cuadro 2. Resultados referentes al número de especies cosechadas muestreadas para las combinaciones de intensidad de corte, plan de corte e intensidad de muestreo, para la UPA – 02 con área total de 4 690 ha. IC = intensidad de corte, en m³ ha⁻¹; PC = plan de corte; Mín. = número mínimo de especies muestreadas; Media = número medio de especies muestreadas; Máx. = número máximo de especies muestreadas; S = desviación estándar; y CV% = coeficiente de variación.

Table 2. Results of the number of sampled harvested species for the combinations of cutting intensity, cutting plan and sampling intensity for the UPA-02 with a total area of 4 690 ha. In which: IC = cutting intensity, in m³ ha⁻¹; PC = cutting plan; Media = mean number of sampled species; Max = maximum number of sampled species; S = standard deviation; and CV% = coefficient of variation.

Intensidad de muestreo de 1:1 000							Intensidad de muestreo de 1:750							
IC	PC	Mín.	Media	Máx.	S	CV%	IC	PC	Mín.	Media	Máx.	S	CV%	
22 m ³ ha ⁻¹	1	79	82	84	1,95	2,37	22 m ³ ha ⁻¹	1	87	88	90	1,22	1,39	
	2	81	83	84	1,10	1,32		2	87	90	94	3,00	3,33	
	3	78	81	83	1,92	2,38		3	85	87	88	1,22	1,41	
	4	81	83	85	1,48	1,78		4	87	89	90	1,10	1,23	
	5	83	85	88	2,00	2,35		5	88	90	95	2,95	3,27	
30 m ³ ha ⁻¹	1	77	82	85	3,27	4,00	30 m ³ ha ⁻¹	1	86	86	87	0,55	0,63	
	2	77	79	81	1,52	1,91		2	86	88	92	2,68	3,04	
	3	78	81	83	2,30	2,86		3	86	87	89	1,10	1,26	
	4	77	80	85	3,16	3,95		4	83	87	91	2,97	3,43	
	5	78	82	87	3,29	3,99		5	84	89	95	4,74	5,33	
Intensidad de muestreo de 1:500							Intensidad de muestreo de 1:250							
IC	PC	Mín.	Media	Máx.	S	CV%	IC	PC	Mín.	Media	Máx.	S	CV%	
22 m ³ ha ⁻¹	1	104	106	108	1,67	1,57	22 m ³ ha ⁻¹	1	123	124	125	0,89	0,72	
	2	103	105	108	1,79	1,70		2	124	125	126	1,10	0,87	
	3	101	104	107	2,17	2,08		3	123	125	129	2,68	2,15	
	4	105	106	107	0,89	0,84		4	126	127	129	1,22	0,96	
	5	106	109	112	2,28	2,09		5	125	126	128	1,52	1,20	
30 m ³ ha ⁻¹	1	101	104	108	2,55	2,45	30 m ³ ha ⁻¹	1	123	124	126	1,14	0,92	
	2	102	104	108	2,45	2,36		2	122	124	126	1,52	1,22	
	3	101	104	107	2,19	2,11		3	123	125	127	2,00	1,60	
	4	104	104	106	0,89	0,86		4	123	124	127	1,67	1,35	
	5	101	104	107	2,19	2,11		5	124	125	127	1,14	0,91	
Intensidad de muestreo de 1:200							Enfoque B							
IC	PC	Mín.	Media	Máx.	S	CV%	IC	PC	NE	Mín.	Media	Máx.	S	CV%
22 m ³ ha ⁻¹	1	128	130	131	1,10	0,84	22 m ³ ha ⁻¹	1	139	23	24	25	0,89	3,67
	2	129	130	130	0,45	0,34		2	139	28	29	30	1,10	3,75
	3	127	128	130	1,22	0,96		3	140	23	24	25	0,71	2,95
	4	129	131	132	1,30	1,00		4	140	24	25	27	1,41	5,66
	5	129	130	132	1,10	0,84		5	141	25	27	29	1,52	5,70
30 m ³ ha ⁻¹	1	129	130	131	0,84	0,64	30 m ³ ha ⁻¹	1	140	29	31	34	2,30	7,33
	2	128	129	130	1,00	0,78		2	141	20	25	30	4,36	17,44
	3	128	129	131	1,30	1,01		3	141	30	31	33	1,34	4,27
	4	128	129	131	1,22	0,95		4	140	22	24	25	1,34	5,68
	5	127	129	132	1,95	1,51		5	142	29	31	36	2,79	8,89

A, es decir, el número de especies del PC, muestreadas para las combinaciones de IC, PC e intensidad de muestreo se presentan en la Cuadro 2. Para las ICs

de 22 m³ ha⁻¹ y 30 m³ ha⁻¹ e intensidades de muestreo de 1:1 000 a 1:200, fueron generadas cinco (0,11 %) y 23 (0,49 %) parcelas permanentes de 1 ha (100 x 100

Cuadro 3. Análisis de resultados del Enfoque B, media, máximo, mínimo, desviación estándar y coeficiente de variación referente al número óptimo de parcelas permanentes a ser creadas para atender la lista de especies cosechadas para cada plan de corte (PC) e intensidad de corte (IC). NE = número de especies muestreadas; n_1 = número óptimo de parcelas o intensidad óptima de muestreo para atender la lista de especies cosechadas; Mín. = número mínimo de especies muestreadas; Media = número medio de especies muestreadas; Máx. = número máximo de especies muestreadas; S = desviación estándar; CV% = coeficiente de variación; EC = error de muestreo calculado; y n_2 = intensidad de muestreo para 10% de error de muestreo, a 95 % de probabilidad.

Table 3. Analysis of the results of the approach B, mean, maximum, minimum, standard deviation and coefficient of variation for the optimum number of plots to be used to meet the list of species harvested in each cutting plan and cutting intensity. In which: IC = cutting intensity, in $m^3 ha^{-1}$; PC = cutting plan; NE = number of sampled species; n_1 = optimum sampling intensity or optimum number of permanent plots to meet the list of harvested species; Mín. = minimum number of sampled species; Media = mean number of sampled species; Máx. = maximum number of sampled species; S = standard deviation; CV% = coefficient of variation; EC(%) = percent sampling error; and n_2 = sampling intensity for sampling error of 10% and probability of 95 %.

IC	PC	NE	n_1	Mín.	Media	Máx.	S	CV%	EC(%)	n_2
22 $m^3 ha^{-1}$	1	139	24	23	24	25	0,89	3,67	16,0011	58
	2	139	29	28	29	30	1,10	3,75	21,2595	122
	3	140	24	23	24	25	0,71	2,95	21,1967	99
	4	140	24	24	25	27	1,41	5,66	16,3685	60
	5	141	27	25	27	29	1,52	5,70	22,2463	124
30 $m^3 ha^{-1}$	1	140	29	29	31	34	2,30	7,33	20,1987	111
	2	141	20	20	25	30	4,36	17,44	17,2787	55
	3	141	27	30	31	33	1,34	4,27	21,2895	114
	4	140	22	22	24	25	1,34	5,68	20,0962	81
	5	142	28	29	31	36	2,79	8,89	21,5238	121

m) cada una, respectivamente, para muestreo de las 4 690 ha. Fueron muestreadas, en promedio, 83 y 130 especies, equivalente a 55 % y 91 %, respectivamente, del total de especies factibles de corte. En general, se observaron variaciones entre ICs y PCs en relación a la cantidad de especies muestreadas, pero con bajo coeficiente de variación (CV). Los PCs con IC 22 $m^3 ha^{-1}$ mostraron menor CV; el mayor CV fue de 5,33 % para la intensidad de muestreo 1:750 (PC 5) y el más bajo, de 0,34 % para la intensidad de muestreo 1:200 (PC 2).

El Cuadro 3 muestra los resultados del enfoque B, es decir, la intensidad de muestreo de parcelas permanentes para satisfacer la restricción de muestrear todas las especies explotadas (FSC, 2002), así como la intensidad muestreo para un error de muestreo de 10 %, con una probabilidad del 95 % (NT/IBAMA 01/07).

Para muestrear todas las especies cosechadas con ICs de 22 $m^3 ha^{-1}$ y 30 $m^3 ha^{-1}$ fueron necesarias, como mínimo, 26 (0,55 %) y 29 (0,62 %) parcelas permanentes, respectivamente. Finalmente, la intensidad óptima considerando un muestreo aleatorio simple fue, como mínimo, 1:180 y 1:162 para las ICs de 22 $m^3 ha^{-1}$ y 30 $m^3 ha^{-1}$, respectivamente. El número de especies muestreadas en las dos intensidades de corte son iguales estadísticamente, según el test L&O al 95 % de probabilidad (Leite & Oliveira, 2002).

Discusión

Las directrices para la instalación y medición de parcelas permanentes en bosques naturales de la Amazonia brasileña (MMA, 2004; Silva et al., 2005) establecen que, parcelas permanentes con intensidad de muestreo de 1:250 ha de área forestal productiva, deben ser instaladas y medidas antes de cualquier intervención en el bosque. Por lo tanto, la intensidad óptima y la localización de parcelas permanentes que contemplen todas las especies del PC sólo podrán determinarse a partir de datos de censo con mapeo de árboles, de la determinación del PC y con el uso de técnicas de información geográfica (SIG) asociadas con técnicas de simulación, programación matemática y algoritmos.

El uso de algoritmos genéticos permitió identificar la intensidad de muestreo que cumple con el Principio n° 08 del FSC (Cuadro 3). Aunque no existan estudios que relacionen intensidad de muestreo con el uso de técnicas de simulación, programación matemática y algoritmos, se puede observar la eficacia de estas herramientas en el trabajo relacionados con otras áreas de la ciencia forestal, como en los estudios realizados por Oliveira et al. (2002), Berger et al. (2003), Soares et al. (2003), Ducheyne et al. (2004) y Rodrigues et al. (2004).

El uso de algoritmos genéticos permitió identificar la intensidad de muestreo que cumple con el Principio n° 08 del FSC (Cuadro 3). Aunque no existan estudios que relacionen intensidad de muestreo con el uso de técnicas de simulación, programación matemática y algoritmos, se puede observar la eficacia de estas herramientas en el trabajo relacionados con otras áreas de la ciencia forestal, como en los estudios realizados por [Oliveira et al. \(2002\)](#), [Berger et al. \(2003\)](#), [Soares et al. \(2003\)](#), [Ducheyne et al. \(2004\)](#) y [Rodrigues et al. \(2004\)](#).

Con la finalidad de satisfacer la creciente demanda de productos sostenibles, se necesitan estudios que incluyan modelos matemáticos, algoritmos y heurísticas para fundamentar la elaboración, implementación y seguimiento de PMFS. Con esta base, este trabajo desarrolló una metodología para determinar la intensidad de muestreo de parcelas permanentes, de tal forma que todas las especies incluidas en los respectivos planes de corte sean muestreadas, garantizando el seguimiento de éstas y la sostenibilidad del ecosistema. Para eso, fueron probadas intensidades de muestreo de 1:1000, 1:750, 1:500, 1:250 y 1:200, en las ICs 30 m³ ha⁻¹ y 22 m³ ha⁻¹, para observar el porcentaje de especies cosechadas consideradas en el monitoreo de las parcelas permanentes.

Las intensidades de muestreo de parcelas permanentes de 1:1000 hasta 1:200 no contemplaron todas las especies a ser explotadas en los respectivos planes de corte. Los porcentajes de especies a ser explotadas y que serían muestreadas en las correspondientes intensidades de muestreo de parcelas permanentes variaron de 55 % a 91 %; por lo tanto, no cumplirían el Principio n° 08 del FSC ([FSC, 2002](#)). Destácase que la intensidad de muestreo de parcelas permanentes de 1:250 establecida en las Directrices simplificadas para la instalación y medición de parcelas permanentes en bosques naturales de la Amazonia brasileña ([MMA, 2004](#); [Silva et al., 2005](#)) tampoco cumplió lo establecido en el Principio n° 08 del FSC ([FSC, 2002](#)); entonces, no fue posible muestrear el 100 % de las especies explotadas en intensidades de muestreo preestablecidas (Enfoque A).

Por su parte, el Enfoque B permitió cumplir con el requisito de la certificación ([FSC, 2002](#)), mediante el cual se obtuvo que la intensidad de muestreo de parcelas permanentes debe ser de, 1:180 para la intensidad de corte de 22 m³ ha⁻¹ y 1:165 para la intensidad de corte de 30 m³ ha⁻¹ (Cuadro 3).

La determinación de intensidad de muestreo de parcelas permanentes considerando todas las especies explotadas en sus planes de corte ([FSC, 2002](#)) que permite su establecimiento antes de que se realice cualquier actividad impactante en el bosque ([MMA, 2004](#)) sólo fue posible por medio de la combinación del Sistema de Información Geográfica con el Algoritmo

Genético. Se trata de una metodología eficiente y eficaz que puede contribuir a la mejora del MFS de los bosques nativos de Brasil.

Las intensidades óptimas de muestreo de parcelas permanentes obtenidas a través del Enfoque B cuyo error de muestreo calculado promedio fue de 19 % para la IC de 22 m³ ha⁻¹ y de 20 % para la IC de 30 m³ ha⁻¹ (Cuadro 3), no cumplirían las respectivas intensidades de muestreo exigidas por la NT/IBAMA 01/07, que establece una intensidad de muestreo condicionada por un error del 10 % con 95 % de probabilidad. Estos resultados tampoco coinciden con lo descrito en estudios previos realizados por [Péllico Neto & Brena \(1997\)](#) quienes afirman que el máximo error aceptable en inventarios forestales es de 10 % en la estimación del volumen por hectárea; sin embargo, es importante mencionar que, si bien, dichos estudios fueron basados en inventarios forestales realizados en la Amazonia para estimación del volumen; adoptaron el nivel de inclusión de DAP ≥ 45 cm ([de Oliveira, Higuchi, Celes, & Higuchi, 2014](#)), diferente al adoptado en el presente estudio.

Conclusiones

La combinación del Sistema de Información Geográfica con la aplicación del Algoritmo Genético permitió desarrollar una metodología capaz de identificar la intensidad óptima de muestreo para satisfacer la restricción impuesta por el FSC.

La intensidad óptima de parcelas permanentes para muestrear todas las especies explotadas, de acuerdo al Principio n° 08 del FSC, fue de 1:180 y 1:165 para intensidades de corte de 22 m³ ha⁻¹ y 30 m³ ha⁻¹, respectivamente.

Agradecimientos

Al Grupo Orsa, por conceder los datos en virtud del acuerdo celebrado con la Sociedad de Investigaciones Forestales (SIF) y la Universidad Federal de Viçosa, vigente a partir del 15/01/2008 al 14/01/2013.

Referencias

- Alcântara, A. E. M. de. (2015). Redes neurais artificiais para prognose do crescimento e da produção de povoamentos de eucalipto em Minas Gerais.
- Alder, D., & Synnott, T. J. (1992). Permanent sample plot techniques for mixed tropical forest. BOOK, Oxford Forestry Institute, University of Oxford.

- Berger, R., Timofeiczuk Jr, R., Carnieri, C., Lacowicz, P. G., Junior, J. S., & Brasil, A. A. (2003). Minimização de custos de transporte florestal com a utilização da programação linear. *Floresta*, 33(1), 53–62.
- BRASIL. (2012). Código Florestal. Lei No 12.651, de 25 de maio de 2012. Diário Oficial da União (Vol. 28).
- Camacho, M. (2000). Parcelas permanentes de muestreos en bosque natural tropical: guía para el establecimiento y medición. Turrialba, CR. *CATIE*, (42), 2–19.
- Cavalcanti, F. J. de B., Machado, S. do A., & Hosokawa, R. T. (2009). Tamanho de unidade de amostra e intensidade amostral para espécies comerciais da Amazônia. *Floresta*, 39(1), 207–214.
- Chen, S. H., Jakeman, A. J., & Norton, J. P. (2008). Artificial intelligence techniques: an introduction to their use for modelling environmental systems. *Mathematics and Computers in Simulation*, 78(2), 379–400. *JOUR*.
- Coulson, R. N., Folse, L. J., & Loh, D. K. (1987). Artificial intelligence and natural resource management. *Science*, 237, 262–268. *JOUR*.
- Ducheyne, E. I., De Wulf, R. R., & De Baets, B. (2004). Single versus multiple objective genetic algorithms for solving the even-flow forest management problem. *Forest Ecology and Management*, 201(2), 259–273. *JOUR*.
- Ducheyne, E. I., De Wulf, R. R., & De Baets, B. (2006). A spatial approach to forest-management optimization: linking GIS and multiple objective genetic algorithms. *International Journal of Geographical Information Science*, 20(8), 917–928. *JOUR*.
- Eskelson, B. N. I., Temesgen, H., Lemay, V., Barrett, T. M., Crookston, N. L., & Hudak, A. T. (2009). The roles of nearest neighbor methods in imputing missing data in forest inventory and monitoring databases. *Scandinavian Journal of Forest Research*, 24(3), 235–246. *JOUR*.
- FSC, F. S. C. Padrões de certificação do FSC para manejo florestal em terra firme na Amazônia Brasileira, Brasília: Grupo de Trabalho do FSC no Brasil (2002). Brasília-DF.
- Garcia, A. L., Garcia, B., & Friedmann, C. V. (2000). Resolução de um problema de equilíbrio de trabalho e distribuição de agentes de serviço. In *SIMPÓSIO BRASILEIRO DE PESQUISA OPERACIONAL* (pp. 923–935). Anais, Viçosa: Universidade Federal de Viçosa.
- Goldberg, M. C., & Luna, H. P. L. (2000). Otimização combinatória e programação linear: modelos e algoritmos. Rio de Janeiro: Campus.
- Güvenir, H. A., & Erel, E. (1998). Multicriteria inventory classification using a genetic algorithm. *European Journal of Operational Research*, 105(1), 29–37. *JOUR*.
- Holland, J. H. (1975). *Adaptation in natural and artificial systems*. Ann Arbor, MI: University of Michigan Press and. *JOUR*.
- Holland, J. H., & Goldberg, D. (1989). *Genetic algorithms in search, optimization and machine learning*. Massachusetts: Addison-Wesley. *JOUR*.
- Leite, H. G., & Oliveira, F. H. T. de. (2002). Statistical procedure to test identity between analytical methods. *Communications in Soil Science and Plant Analysis*, 33(7–8), 1105–1118. <https://doi.org/10.1081/CSS-120003875>
- Mitchell, M. (1998). *An introduction to genetic algorithms*. BOOK, MIT press.
- MMA. (2004). *Diretrizes Simplificadas para instalação e medição de parcelas permanentes em florestas naturais da Amazônia brasileira*. Ministerio Do Medio Ambiente. BOOK, Manaus-AM.
- Oliveira, F. de, Volpi Patias, N. M., & Sanquetta, C. R. (2002). Aplicação de goal programming em um problema florestal. *Ciência Florestal*, 12(2). *JOUR*.
- Oliveira, M. M. de, Higuchi, N., Celes, C. H., & Higuchi, F. G. (2014). Tamanho e formas de parcelas para inventários florestais de espécies arbóreas na Amazônia Central. *Ciência Florestal*, 24(3), 645–653. <https://doi.org/10.5902/1980509815744>
- Ortiz, E., & Quirós, D. (2002). Definiciones y tipos de inventarios forestales. In L. Orozco & C. Brumér (Eds.), *Inventarios forestales para bosques latifoliados en América Central* (p. 264). Serie Técnica N° 50, Turrialba-CR: CATIE.
- Péllico Neto, S., & Brena, D. A. (1997). *Inventário florestal*. (S. Péllico Neto & D. A. Brena, Eds.), Curitiba-PR. *JOUR*.
- Peng, C., & Wen, X. (1999). Recent applications of artificial neural networks in forest resource management: an overview. *Transfer*, 1(X2), W1. *JOUR*.
- Pereira, J. A. G. (2012). *Lucro verde na floresta*. Retrieved from <http://revistagloborural.globo.com/Revista/Common/0,,EMI297874-18282,00-LUCRO+VERDE+NA+FLORESTA.html>
- Pires, J. M. (1974). *Tipos de vegetação da Amazônia*. Boletim Do Museu Paraense Emílio Goeldi, 20, 179–202.
- Pires, M. J. P. (1991). *Phenology of selected tropical trees from Jari, lower Amazon, Brazil (Thesis (Ph.D.))*. University of London.
- Quintero, M. A., Jerez, M., & Ablan, M. (2011). Evaluación de tres técnicas heurísticas para resolver un modelo de planificación del aprovechamiento en plantaciones forestales industriales. *Interciencia*, 36(5). *JOUR*.
- Rebello, F. R., & Hamacher, S. (2000). Uma Proposta de Algoritmo Genético de Duas Fases para Roteamento de Veículos. In *SIMPÓSIO BRASILEIRO DE PESQUISA OPERACIONAL* (pp. 672–688). Anais, Viçosa: Universidade Federal de Viçosa.
- Rodrigues, F. L., Leite, H. G., Santos, H. do N., Souza, A. L. de, & Ribeiro, C. A. Á. S. (2004). Metaheurística simulated annealing para solução de problemas de planejamento florestal com restrições de integridade. *Revista Árvore*, 28(2), 247–256. *JOUR*.
- Rykiel, E. J. (1989). Artificial intelligence and expert systems in ecology and natural resource management. *Ecological Modelling*, 46(1–2), 3–8. *JOUR*.
- Santacruz Delgado, A. M. (2010). Diseño de redes de muestreo óptimas para el monitoreo del carbono orgánico del suelo en el CI La Libertad mediante la aplicación de algoritmos genéticos/Design of optimal sampling networks for soil organic carbon monitoring at CI La Libertad by applying g. DISS, Universidad Nacional de Colombia; Instituto Geográfico Agustín Codazzi.
- Santana, A. C. de, Santos, M. A. S. dos, Santana, Á. L. de, & Gazel Yared, J. A. (2012). O valor econômico da extração manejada de madeira no Baixo Amazonas, Estado do Pará.

Revista *Árvore*, 36(3), 527–536. JOUR.

- Schreuder, H. T., Gregoire, T. G., & Wood, G. B. (1993). Sampling methods for multiresource forest inventory. BOOK, John Wiley & Sons.
- SFB. (2013). Florestas do Brasil em resumo: dados de 2007 a 2012. Serviço Florestal Brasileiro. Brasília-BR. Retrieved from http://www.florestal.gov.br/snif/images/Publicacoes/florestas_do_brasil_em_resumo_2013_atualizado.pdf
- Silva, J. N. M., Carmo Alves Lopes, J. do, Oliveira, L. C. de, Silva, S. M. A. da, Carvalho, J. O. P. de, Costa, D. H. M., ... Tavares, M. J. M. (2005). Diretrizes para instalação e medição de parcelas permanentes em florestas naturais da Amazônia brasileira. BOOK, EMBRAPA Amazonia Oriental, Belém, PA (Brasil) Ministério da Agricultura, Pecuária e Abastecimento, Brasília, DF (Brasil) CIFOR, Belém (Brasil).
- Soares, T. S., Vale, A. B. Do, Leite, H. G., & Machado, C. C. (2003). Otimização de multiprodutos em povoamentos florestais. *Revista Árvore*, 27(6), 811–820. JOUR. <https://doi.org/10.1590/S0100-67622003000600007>
- Souza, A. L. de, Medeiros, R. M. de, Matos, L. M. S., Silva, K. R., Corrêa, P. A., & de Faria, F. N. (2014). Estratificação volumétrica por classes de estoque em uma floresta ombrófila densa, no Município de Almeirim, Estado do Pará, Brasil. *Revista Árvore*, 38(3), 533–541. JOUR.
- Tomppo, E. (2006). The finnish multi-source national forest inventory – small area estimation and map production. In A. Kangas & M. Maltamo (Eds.), *Forest inventory: methodology and applications* (Vol. 10, pp. 195–224). BOOK, Dordrecht: Springer Science & Business Media. Retrieved from www.springer.com
- Tomppo, E., & Halme, M. (2004). Using coarse scale forest variables as ancillary information and weighting of variables in k-NN estimation: a genetic algorithm approach. *Remote Sensing of Environment*, 92(1), 1–20. JOUR.
- Veloso, H. P., Rangel Filho, A. L. R., & Lima, J. C. A. (1991). Classificação da vegetação brasileira, adaptada a um sistema universal. BOOK, Ministério da Economia, Fazenda e Planejamento, Fundação Instituto Brasileiro de Geografia e Estatística, Diretoria de Geociências, Departamento de Recursos Naturais e Estudos Ambientais.
- Veríssimo, A., & Pereira, D. (2015). Produção na Amazônia Florestal: características, desafios e oportunidades. *Parcerias Estratégicas*, 19(38), 13–44. JOUR.
- Verjans, J.-M. (2012). Interpretación de los principios y criterios del FSC en manejo forestal. *Revista Forestal Mesoamericana Kurú*, 8(21), 13–16. JOUR.

Este artículo debe citarse como:

Silva-Matos, LM; Lopes-de-Souza, Breda-Binoti, DH; Fernandes-Filho, EI; Dávila-Vega, AE; Elera-González, DG; de Albuquerque-Santos, AC; Alves-Corrêa, P; Regina-Silva, K. (2018). Determinación de la intensidad de muestreo en inventario forestal continuo en un bosque tropical lluvioso denso, Amazonia Oriental, Brasil. *Revista Forestal Mesoamericana Kurú*, 15(37), 48-57. doi. 10.18845/rfmk.v15i37.3601