

UNIVERSIDAD SAN FRANCISCO DE QUITO
Colegio de Posgrados

Manejo específico por sitio en el aprovechamiento de *Guadua angustifolia*: Implementación de un SIG para la trazabilidad de los tallos de guadua en la hacienda Maravélez, municipio de La Tebaida, Quindío-Colombia

Jairo Augusto Caro Mejía
Richard Resl, Ph.D.(c), Director de tesis

Tesis de grado como requisito para la obtención del título de
Magister en Sistemas de Información Geográfica

Quito, noviembre de 2014

UNIVERSIDAD SAN FRANCISCO DE QUITO

Colegio de Posgrados

HOJA DE APROBACIÓN DE TESIS

Manejo específico por sitio en el aprovechamiento de *Guadua angustifolia*: Implementación de un SIG para la trazabilidad de los tallos de guadua en la hacienda Maravélez, municipio de La Tebaida, Quindío-Colombia

Jairo Augusto Caro Mejía

Richard Resl Ph.D.(c)
Director de Tesis

.....

Laure Collet, M.Sc.
Miembro de comité de tesis

.....

Richard Resl Ph.D.(c)
Director de la Maestría en Sistemas de Información Geográfica

.....

Stella de la Torre PhD.
Decana del Colegio de Ciencias Biológicas y Ambientales

.....

Victor Viteri PhD.
Decano del Colegio de Postgrados

.....

Quito, noviembre de 2014

© DERECHOS DE AUTOR

Por medio del presente documento certifico que he leído la Política de Propiedad Intelectual de la Universidad San Francisco de Quito y estoy de acuerdo con su contenido, por lo que los derechos de propiedad intelectual del presente trabajo de investigación quedan sujetos a lo dispuesto en la Política.

Asimismo, autorizo a la USFQ para que realice la digitalización y publicación de este trabajo de investigación en el repositorio virtual, de conformidad a lo dispuesto en el Art. 144 de la Ley Orgánica de Educación Superior.

JAIRO AUGUSTO CARO MEJIA
ID 79780865

Quito, noviembre de 2014

Para Isabela y Nelly

“Un viaje de mil millas comienza con un paso”

Lao Tse

Agradecimientos

Quiero resaltar la colaboración de las siguientes personas que contribuyeron en esta investigación.

A la directora de la tesis, Laure Collet, por sus invaluable aportes a lo largo del desarrollo del trabajo.

Diego Felipe Ocampo y Fabián Molina fueron excelentes compañeros de trabajo durante los primeros recorridos. Gracias a Alejandro Hoyos, quien permitió el desarrollo de las actividades de premuestreo en el rancho La Soledad. Un agradecimiento muy especial al ingeniero forestal Guillermo Lozano, quien facilitó la información de las parcelas para el análisis de los datos, y a su equipo de campo, Julio y Marco, quienes me acompañaron en los recorridos de georreferenciación de los guaduales. A La oficina de planeación de la gobernación del Quindío, en cabeza de Cristian Bedoya, por su colaboración en la información suministrada. El investigador Juan Carlos Camargo, quien me facilitó una copia de su libro *Mensura e inventario forestal para la planificación y manejo sostenible de bosques de guadua*, herramienta que fue muy importante en la elaboración del trabajo. Muchas gracias a los investigadores Charles Menza y Ken Buja, quienes cordialmente respondieron todas las inquietudes sobre la herramienta *Sampling Design Tool for ArcGIS*

Nohelia Mejía, quien como madre y directora de la Corporación Ecocalidad Empresarial, fue una voz de orientación y respaldo en el desarrollo de esta investigación. A Diego Caro, por su apoyo para la toma de datos.

El más reconocido y cariñoso agradecimiento para Isabela y Nelly, que son mi apoyo incondicional.

Resumen

La guadua bambú (*Guadua angustifolia*) es un recurso ecológicamente importante, abundante y disperso. Los guaduales son bosques de 1-5 hectáreas que forman una cobertura de 28.000 ha a lo largo de cuencas hídricas en la región del Eje Cafetero colombiano. Cumplen un papel importante en la región en el desarrollo ambiental, social y económico, y su aprovechamiento está sujeto a la aprobación del plan de manejo que revisa la autoridad ambiental. La calidad de la guadua empleada en los sectores de construcción, artesanía y laminados tiene características específicas para cada caso y está determinada por la calidad de sitio donde crece el material. El empleo del SIG facilitó la definición de áreas de producción y evaluó la metodología para proponer un diseño de aprovechamiento específico por sitio en la hacienda Maravélez (Quindío-Colombia), para conocer cantidades y calidades de los culmos de guadua disponibles por lote. Los resultados se obtuvieron a partir del análisis geoestadístico (estadística descriptiva, semivariogramas y método de interpolación spline) de las densidades de tallos comerciales por parcela y los diámetros a la altura del pecho (DAP). El mercado principal para los culmos guadua de la hacienda Maravélez se identificó para el sector de laminados. Finalmente, se realizó un análisis costo-beneficio de diferentes alternativas tecnológicas de rastreo (dispositivos de marcación) para la trazabilidad del material y se identificaron los métodos más idóneos de acuerdo al estado actual del sector; en su orden, la pintura, la pintura con microtaggants (nanopartículas) y los códigos de barra.

Palabras clave: *Guadua angustifolia*; manejo específico por sitio; SIG; trazabilidad; Quindío, Eje Cafetero Colombiano.

Abstract

Bamboo *Guadua angustifolia* is an ecologic important, abundant and dispersed resource. *Guaduales* are mixed forests scattered along watersheds in small patches of 1-5 ha each that represent a 28,000 ha landcover in the in the Colombian Coffee Region. They play an important role in the region in the environmental, social and economic development and its harvesting is determined by the approval of the management plan by the environmental authority. Quality of guadua for construction, handicrafts and plywood sectors has specific characteristics in each case and is determined by the quality of the site where it grows. The use of GIS helped to delimitate productivity areas and to propose a site specific management in Maravelez Farm (Quindío, Colombia), differentiating quantities and qualities of available guadua culms per stand. Results were obtained from the geostatistical analysis (descriptive statistics, semivariograms and spline interpolating method) of densities of commercial culms and diameters at breast height (DBH). The main market for guadua bamboo culms of Maravélez Farm, corresponds to plywood sector. Finally, a cost-benefit analysis of different alternatives of tracking technologies (marking devices) for traceability of the material was developed and the most suitable methods according to the development of the sector were identified; in its order, paint, paint with microtaggants (nanotechnology) and barcodes.

Keywords: *Guadua angustifolia*; site specific management; GIS; traceability; Quindío, Colombia; Colombian Coffee Region.

Tabla de contenido

Resumen	7
Abstract	8
Lista de gráficos	13
Lista de ilustraciones	14
Lista de mapas	15
Lista de tablas	16
Lista de fotografías	17
1 Introducción	18
1.1 Antecedentes	18
1.2 Objetivos	20
1.2.1 Objetivo general	20
1.2.2 Objetivos específicos	20
1.3 Preguntas de investigación	20
1.4 Hipótesis	21
1.5 Justificación	21
1.6 Alcance	24
2 Marco teórico	28
2.1 La guadua	28
2.1.1 Descripción general de la guadua	28
2.1.2 Bienes y servicios ambientales	34
2.1.3 Beneficios económicos	35
2.2 Plan de manejo y aprovechamiento de guadua	36
2.3 Tecnologías de manejo específico por sitio	37
2.3.1 Manejo específico por sitio para la agricultura y los bosques	38
2.3.2 Enfoques de manejo basado en mapas y en sensores	41
2.3.3 Manejo sostenible de bosques	43

		10
2.3.4	Tecnologías empleadas para la marcación _____	44
2.3.5	Manejo por sitio específico para guadua _____	50
2.3.6	Marcación para la trazabilidad de productos de guadua _____	51
2.4	Análisis geoestadístico _____	52
2.4.1	Términos empleados en geoestadística _____	52
2.4.2	Técnicas determinísticas de interpolación _____	57
3	Metodología _____	59
3.1	Área de estudio _____	59
3.1.1	Localización _____	59
3.1.2	Usos y cobertura de la tierra _____	59
3.1.3	Clima _____	60
3.1.4	Geología y Geomorfología. _____	61
3.1.5	Suelos _____	63
3.1.6	Hidrografía _____	66
3.1.7	Formaciones Vegetales _____	66
3.1.8	Flora y Fauna _____	66
3.2	Pasos de metodología _____	68
3.2.1	Georreferenciación de los bosques de guadua _____	68
3.2.2	Muestreo aleatorio por conglomerados _____	70
3.2.3	Trabajo de campo y procesamiento de datos _____	72
3.2.4	Determinación de la población _____	74
3.2.5	Análisis geoestadístico _____	74
3.2.5.1	Exploración de los datos _____	74
3.2.5.2	Gráfico de interpolación _____	75
3.2.6	Análisis de costo-beneficio _____	76
4	Resultados _____	79
4.1	Inventario forestal _____	79

4.1.1	Georreferenciación de los bosques de guadua _____	79
4.1.2	Muestreo Aleatorio por conglomerados _____	80
4.1.2.1	Cálculo de la intensidad de muestreo _____	80
4.1.2.2	Selección de unidades y subunidades de muestreo _____	80
4.1.3	Procesamiento de datos _____	83
4.1.4	Determinación de la población _____	83
4.1.5	Análisis geoestadístico _____	84
4.1.5.1	Densidad de tallos comerciales _____	84
4.1.5.2	Análisis de autocorrelación espacial tallos comerciales _____	86
4.1.5.3	Gráfica de interpolación tallos comerciales _____	89
4.1.5.4	Diámetro a la altura del pecho (DAP) _____	92
4.1.5.5	Análisis de autocorrelación espacial para los datos de DAP _____	93
4.1.5.6	Gráfica de interpolación DAP _____	95
4.1.5.7	Correlación entre DAP y densidad de tallos _____	98
4.1.5.8	Estados de madurez _____	98
4.2	Análisis costo-beneficio _____	101
5	Análisis de resultados _____	105
5.1	¿Qué ventajas y desventajas presenta el uso de imágenes de satélite para la espacialización y mapeo de los rodales productivos de guadua? _____	105
5.2	De acuerdo a los datos de caracterización que se obtengan en las parcelas, ¿es posible determinar el mercado en que dicha guadua puede ofrecerse? _____	107
5.3	¿Cuáles son las herramientas de un SIG necesarias para estimar la capacidad productiva de un rodal de guadua al nivel de finca? _____	109
5.3.1	Georreferenciación de los bosques de guadua _____	110
5.3.2	Diseño del Muestreo Aleatorio por Conglomerados _____	110
5.3.3	Exploración de datos _____	110
5.3.4	Propuesta de manejo específica _____	111

5.4	Basado en un análisis de costo-beneficio, ¿Cuál sería la mejor tecnología de marcación para la trazabilidad de los rodales de guadua? _____	115
5.5	Consideraciones finales: ¿es posible reproducir esta metodología en otras fincas (otros escenarios)? y ¿qué recursos son necesarios para su implantación? _____	118
6	Conclusiones _____	121
7	Referencias _____	127
8	ANEXOS _____	137
8.1	Anexo. Selección del método Spline para el conjunto de datos. _____	138

Lista de gráficos

Gráfico 1. Intensidad de manejo y nivel de inversión que se debe practicar en la administración del bosque en función de los productos a obtener.	40
Gráfico 2. Partes de un semivariograma.....	57
Gráfico 3. Modelos determinísticos de interpolación	58
Gráfico 4. Función de base radial.	58
Gráfico 5. Datos de precipitación y temperatura media anual en el periodo 1900-2009 ...	61
Gráfico 6. Flujograma de trabajo.....	68
Gráfico 7. Cálculo del área de guaduales reduciendo la proyección de ramas y hojas. ...	69
Gráfico 8. Frecuencias relativas de las observaciones del número de tallos comerciales por parcela.....	85
Gráfico 9. Frecuencias relativas y porcentaje acumulado de densidad de tallos comerciales por parcela.....	85
Gráfico 10. Semivariograma a partir de la densidad de tallos por parcela.....	87
Gráfico 11. Semivariograma a partir de la densidad de tallos por parcela.....	88
Gráfico 12. Semivariograma a partir de los datos de densidad de tallos.	89
Gráfico 13. Diámetros máximos y mínimos por parcela	92
Gráfico 14. Frecuencia relativa de clases diamétricas promedio por parcela.	93
Gráfico 15. Semivariogramas a partir de los valores del DAP	94
Gráfico 16. Semivariograma a partir de datos de DAP, generado en el asistente de kriging/cokriging.....	95
Gráfico 17. Correlación entre el total de tallos por parcela	98
Gráfico 18. Valores máximos mínimos y promedios de los individuos observados en las parcelas agrupados por estados de madurez.	99
Gráfico 19. Porcentaje de tallos por estado de madurez.....	100
Gráfico 20. Gradientes de cambio en calidad y crecimiento de la Guadua de acuerdo a la posición geomorfológica.	109
Gráfico 21. Cálculo de RMSPE para cada ubicación.	138

Lista de ilustraciones

Ilustración 1. Evidencias del uso ancestral de la Guadua. Fuente: (Hidalgo, 2003)	28
Ilustración 2. Bambú de crecimiento paquimorfo. Partes de la guadua. Fuente: Hidalgo, 2003.	31

Lista de mapas

Mapa 1. Localización área de estudio.....	60
Mapa 2. Suelos y geomorfología de la zona de estudio. Fuente: SIG Quindío.....	64
Mapa 3. Georreferenciación de matas de guadua en la hacienda Maravélez. Departamento del Quindío, Colombia.	79
Mapa 4. Selección de unidades y subunidades de muestreo.....	82
Mapa 5. Estimación del número de tallos comerciales por unidad de muestreo, empleando el método determinístico radial Spline. Ver detalles en el texto.....	91
Mapa 6. Interpolación de datos para el DAP, empleando el método determinístico radial Spline. Ver detalles en el texto.....	97
Mapa 7. Medición de pendiente en el terreno vs. información disponible a partir de capa de curvas de nivel SIG Quindío. Premuestreo realizado en el rancho La Soledad, Montenegro, Quindío.	107

Lista de tablas

Tabla 1. Características de los diferentes estados de madurez de los culmos de guadua	32
Tabla 2. Métodos físicos de identificación de maderas	46
Tabla 3. Parámetros de descripción cualitativa de los criterios de calificación, para la selección de métodos de identificación para la guadua.	77
Tabla 4. Criterios de calificación cuantitativa para la selección de métodos de identificación para la guadua.	78
Tabla 5. Cálculo del área de cada faja, el número de parcelas y su promedio de individuos, para lograr el total estimado del número de culmos por faja.	83
Tabla 6. Cálculo de variables para la estimación de la población de guadua.	83
Tabla 7. Descripción del costo (operación, inversión y de capacitación) que exige cada uno de los métodos de marcación en guadua considerados.	101
Tabla 8. Calificación de los métodos de marcación	104

Lista de fotografías

Foto 1. Vivienda tradicional de la región del Eje Cafetero, construida estructuralmente con Guadua.....	29
Foto 2. Diversidad florística de los guaduales.....	34
Foto 3. Panorámica de la geomorfología del área de estudio.	62
Foto 4. Guaduales en áreas de producción con pendiente nula o moderada (izq). Guaduales en pendientes superiores a 45° excluidos de áreas productivas (der.).....	70
Foto 5. Presencia de monos aulladores (<i>Alouatta seniculus</i>) en algunos guaduales	70
Foto 6. a) Marca del número consecutivo del individuo en la parcela y su estado de madurez.....	73

1 Introducción

1.1 Antecedentes

La guadua es el regalo de los dioses. Así bautizó en su libro, Oscar Hidalgo, a la guadua. Hidalgo fue un investigador sobresaliente que realizó aportes al conocimiento del bambú y la guadua para Colombia y el mundo, principalmente en el tema de la construcción; su disciplina lo llevó a estudiar una amplia variedad de temas para entender desde la biología y fisiología, cómo funciona la capacidad sismorresistente del material; o desde la ecología, cuál es el papel que cumple la guadua en la dinámica del bosque; o desde el manejo forestal, por qué es importante el aprovechamiento de los culmos maduros para mantener la salud del rodal. Siendo arquitecto, Hidalgo señaló técnicas en artesanía para aplicar a la guadua y al bambú; describió el procesamiento primario y las herramientas empleadas en Asia para obtener cintas, a partir de bambú, para elaborar canastos; técnicas de deformación al calor; métodos de preservación del material. Preciso protocolos para la elaboración de tableros de aglomerados o de laminados y las máquinas necesarias para su fabricación; documentó la aplicación de las fibras de bambú en textiles, en el reforzamiento de compuestos de cemento y su aplicación en carreteras, pozos sépticos, columnas, y por supuesto, presentó con detalle las técnicas y tecnologías de construcción con bambú –y sus patologías-, desde la cimentación hasta el tipo de techos que debe llevar una construcción con diseños tradicionales o modernos. Puentes, aviones, agujas de acupuntura, acueductos rurales, arcos y flechas, son todos elementos que pueden ser elaborados con guadua ([Hidalgo, 2003](#)).

Innumerables aplicaciones del bambú y de la guadua son posibles, de hecho, la guadua se ha seleccionado como una de las 20 especies forestales más importantes a nivel mundial por las propiedades físico mecánicas que presenta y por el potencial que tiene para resolver problemas de vivienda a nivel global ([Takeuchi, 2004](#)).

Tradicionalmente, la guadua ha sido usada por sus habitantes como un recurso sustituto de la madera y, además de los beneficios prácticos y económicos, ha demostrado efectos positivos sobre las características físicas, químicas y biológicas de los suelos (Arias, Camargo, & Cardona, 2008). Tiene una amplia distribución en la región del Eje Cafetero de Colombia y ocupa 28.000 ha en fragmentos de bosque que generalmente no superan las 5 ha, lo cual brinda una capacidad de conectividad de especial interés para procesos de restauración de ecosistemas naturales. Su almacenamiento de biomasa por hectárea alcanza un valor aproximado de 188,5 m³ que compite con plantaciones forestales que toman hasta 20 años para lograr esos mismos volúmenes (Arias et al., 2008). Los beneficios ambientales que presenta la guadua son vastos, cumpliendo funciones en la regulación hídrica, albergue de biodiversidad y belleza paisajística, entre otros.

Considerando el importante conocimiento que hay sobre la guadua, las cifras en la economía local del aprovechamiento de guadua son reducidas y existen problemas a nivel administrativo para regular el corte y el manejo de los guaduales. Se presenta desabastecimiento de materia prima para procesos industriales, aun cuando en la región hay bosques suficientes para realizar un aprovechamiento sostenible. Muchos de los rodales que son aprovechados presentan sobreaprovechamiento, realizado ilegalmente, puesto que los propietarios no son los directos administradores del bosque y encargan a terceros que hacen un manejo insostenible de los guaduales (Mejía & Moreno, 2013).

El presente estudio de caso emplea los datos del plan de manejo de guadua de la hacienda Maravélez ubicada en el municipio de La Tebaida, Quindío, y los incorpora en un sistema de información geográfica para comprobar la posibilidad de administrar el aprovechamiento del recurso mediante una propuesta de manejo específico por sitio, de tal forma que sirva de ejemplo para futuros desarrollos en la región.

1.2 Objetivos

1.2.1 Objetivo general

Implementar un sistema de información geográfica para la administración por sitio específico del aprovechamiento de culmos de *Guadua angustifolia* en la hacienda Maravélez, municipio de La Tebaida, Quindío-Colombia.

1.2.2 Objetivos específicos

- a) Mapear y diferenciar los rodales productivos de guadua
- b) Caracterizar los rodales productivos
- c) Implementar herramientas de SIG para estimar la productividad de tallos por rodal siguiendo los términos de referencia de la norma unificada
- d) Analizar el costo-beneficio de la implementación de tecnologías de rastreo tales como RFID o códigos de barra para la trazabilidad del aprovechamiento.

1.3 Preguntas de investigación

- a) ¿Qué ventajas y desventajas presenta el uso de imágenes de satélite para la espacialización y mapeo de los rodales productivos de guadua?
- b) García y Camargo (2011) realizaron la caracterización de las necesidades de calidad de guadua para los subsectores de artesanía, construcción, muebles y laminados, y obtuvieron las variables morfométricas y edafoclimáticas de rodales de guadua del Eje Cafetero para suplir estos mercados. De acuerdo a los datos de caracterización que se obtengan en las parcelas, ¿es posible determinar el mercado en que dicha guadua puede ofrecerse?
- c) ¿cuáles son las herramientas de un SIG necesarias para estimar la capacidad productiva de un rodal de guadua al nivel de finca?
- d) ¿cuál sería la mejor tecnología de marcación, basado en un análisis de costo-beneficio, para la trazabilidad de los rodales de guadua?

1.4 Hipótesis

El empleo del SIG permite definir áreas de protección y de producción, cantidades y calidades de los culmos de guadua disponibles por lote, de tal forma que es posible proponer un diseño de manejo específico por sitio.

1.5 Justificación

La guadua ha sido cosechada en condiciones naturales por siglos de forma sustentable debido a su relativamente baja demanda en la región cafetera de Colombia. Durante los últimos 10 años, luego del terremoto de 1999, el uso de la guadua incrementó y ayudó profusamente en el proceso de reconstrucción (de Flander, 2005; Tistl & Velásques, 2002) y ha motivado nuevas oportunidades para la región debido a sus capacidades sismorresistentes en construcción y su flexibilidad para ser transformada como sustituto de la madera para materiales compuestos, carbón activado o artesanías (Hidalgo, 2003; Londoño & Clark, 2004; Mejía G et al., 2009). Otra oportunidad importante está relacionada con los bienes y servicios ambientales que la guadua ofrece, como la fijación de carbón, la regulación hídrica, la conservación de la biodiversidad, el paisaje, entre otros (Asamblea departamental del Quindío, 2010; Camargo, Chará, Giraldo, Chará-Serna, & Pedraza, 2011; Federación Nacional de Cafeteros de Colombia, 2011; Ospina & Finegan, 2004; Pagiola et al., 2004; Riaño, Londoño, Gómez, & López, 2002; Rivera-Posada, 2011; Zapata, Murgueitio, Mejía, Zuluaga, & Ibrahim, 2007). Recientemente, su significancia cultural, ambiental y social en la región, contribuyeron en la decisión de la UNESCO de declarar el Paisaje Cultural Cafetero Patrimonio de la Humanidad (UNESCO, 2011).

La guadua es un recurso ecológicamente importante, abundante y disperso. La mayoría de los guaduales son bosques mixtos dominados por guadua (Calle & Méndez, 2009; Ospina & Finegan, 2004) esparcidos a lo largo de las cuencas hídricas en pequeñas manchas de 1-5 ha que forman una cobertura de 28.000 ha en la región del Eje Cafetero colombiano (Kleinn & Morales-Hidalgo, 2006) y que cumplen un papel importante en la regulación hídrica y el manejo del suelo

(Camargo, Chará, et al., 2011; Chará et al., 2011; Dossman, Arias, & Camargo, 2011).

Lo que parece un negocio prometedor e interesante que puede brindar contribuciones ambientales, económicas y sociales a la región y a su gente, es, de hecho, un sector que está siendo afectado por varias situaciones. Entre 2010 y 2013, los actores de la cadena productiva de la guadua discutieron en varios talleres sus perspectivas acerca de las restricciones del sector. Dichos problemas fueron compilados y agrupados en cuatro temas principales que están limitando el desarrollo (Mejía, 2013): a) problemas relacionados con el eslabón de producción primaria; b) problemas relacionados con la articulación de actores y procesos; c) problemas relacionados con la innovación y el desarrollo tecnológico; y, d) problemas relacionados con el desarrollo empresarial.

Para lograr mantener la sostenibilidad de estos bosques, las autoridades ambientales de los departamentos de Caldas (CORPOCALDAS), Quindío (CRQ), Risaralda (CARDER), Tolima (CorTolima) y Valle del Cauca (CVC), regularon el proceso de aprovechamiento mediante la “norma unificada” (Corpocaldas, CRQ, CARDER, CorTolima, & CVC, 2008), un procedimiento obligatorio por el cual el aprovechador obtiene el permiso de corte para un número específico de tallos, mediante la elaboración del plan de manejo diligenciado de acuerdo a los requisitos y que es aprobado por la oficina de control ambiental local. Así, las autoridades evalúan y hacen seguimiento si las metas de producción sostenible están siendo cumplidas en el bosque.

La presión de extracción ha incrementado durante los últimos 10 años y la norma unificada ha jugado un rol importante en la protección de los guaduales de la sobreexplotación. Sin embargo, los procedimientos rigurosos, combinados con baja agilidad gubernamental para responder a las solicitudes de corte, han desmotivado a los agricultores a convertirse en productores de guadua. Por una parte, varios planes de manejo entregados a las autoridades locales son

regresados a los solicitantes porque los documentos no cumplen con los requisitos exigidos; el proceso de revisar los planes de manejo toma más tiempo del que está establecido y los productores abandonan o rehúsan a futuros intentos por la ineficacia de las autoridades locales en responder estas solicitudes. Por otra parte, intermediarios, que conocen el procedimiento, se ofrecen para administrar la cosecha bajo tarifas inequitativas para el productor y, por lo común, sobrepasan – ilegalmente– las intensidades de corte permitidas, desmotivando los negocios en el eslabón de la producción primaria y afectando al sostenibilidad del bosque.

La más clara consecuencia de esta situación es que la mayoría de los bosques de guadua no están siendo cosechados. Además, la inversión en tecnología es limitada para este eslabón de la cadena de suministro, debilitando el desarrollo del sector. Solo el uno por ciento del área está siendo cosechada bajo estándares sustentables regulados con planes de aprovechamiento; sólo el 1% del área ha sido inscrita en programas de biodiversidad o esquemas para el pago de servicios ambientales; 0.2% del área (ca. 55 ha) está certificada con estándares de FSC; y, el 4% implementa tecnologías sustentables en los procesos de cosecha y poscosecha (Mejía & Moreno, 2013). Los certificados de incentivo forestal (CIF) han estado disponibles desde 2005 (Colombia - Departamento Nacional de Planeación, 2013) pero sólo 200 ha fueron establecidas en Antioquia en 2011. Comparativamente, China plantó 3,5 millones de hectáreas de bambú durante los últimos 20 años (Ruiz-Pérez, Zhong, Belcher, Chen, & Maoyi, 1998) dando una base sólida al suministro de materia prima para el desarrollo industrial. Las anteriores cifras muestran cuán poca es la inversión en el eslabón primario, reforzando la idea antes mencionada que los productores no están suficientemente interesados en el negocio, fracturando el principal eslabón de la cadena de valor.

Una estrategia que ha sido propuesta para optimizar el esfuerzo del proceso de planificación y organizar el suministro de materia prima, para responder la demanda, son los núcleos forestales productivos (Moreno, 2006a; Suárez, 2011).

Los núcleos concentran en un plan de manejo varios guaduales cercanos que pueden estar, o no estar, en la misma propiedad. A través de esta estrategia, los propietarios, en acuerdo con el operador forestal, determinan las áreas de aprovechamiento, el tipo de manejo (comercial), la intensidad de cosecha y el tipo de productos a producir, garantizando el suministro de productos con estándares de calidad en un flujo constante y sostenible para ser despachado a los centros de producción primaria (Fedeguadua, 2007; Mejía, 2008), un lugar donde el acopio organizado de materia prima con valor agregado y garantía de calidad, permite la comercialización de productos para sectores como la construcción y la artesanía.

De esta manera, la guadua es un material que se puede emplear en la construcción para suplir el déficit de vivienda en el país, sin embargo, bajo las condiciones actuales de producción, no se ofrecen garantías a los constructores sobre la calidad del material. Para lograr estándares de calidad para el sector de la construcción, la guadua debe cumplir obligatoriamente con el tiempo de madurez en el guadual, garantía que solamente puede ofrecer el productor. En este sentido, la implantación del sistema de marcación que permita el seguimiento de la edad de los culmos desde su nacimiento (renuevo), y su registro en el sistema de información, permitirá no solo conocer las disponibilidades en términos de cantidad y calidad del material, si no que brindará las evidencias y registros para garantizar que los materiales, obtenidos en el aprovechamiento, cumplen con los requisitos de calidad que sectores como el de la construcción demandan.

1.6 Alcance

Los principales alcances de un sistema de información geográfico para la trazabilidad del aprovechamiento de guadua, son:

1. **Organizar el aprovechamiento.** El uso del SIG incorpora variables del sitio (altura, pendiente, aspecto, condiciones de suelo, otros) y se recopila información sobre las características de los productos por sitio (diámetro, altura, biotipo de guadua, longitud de entrenudos, edad del material). Al

disponer de información sobre la localización de las existencias (cantidades) de materia prima estimada en bosque y de las características allí presentes (cualidades), se pueden hacer mapas de productividad y realizar proyecciones sobre el material disponible para comercialización.

2. **Geolocalizar los rodales.** Gracias al uso de equipos de GPS y la información almacenada en el SIG, la organización del aprovechamiento puede visualizarse y se pueden ubicar las áreas de producción para planificar el proceso de transporte. Así mismo, es posible determinar las rutas más cortas para la extracción de la materia prima, analizar el costo en función de las condiciones de terreno, entre otros.
3. **Registrar, monitorear y establecer un sistema de alerta sobre el manejo de lotes autorizados.** Los mapas de productividad permiten al propietario y/o administrador realizar los controles internos en finca y verificar cantidades extraídas respecto a las planeadas en el plan de aprovechamiento. A las autoridades, les facilita expedir salvoconductos y permisos de movilización. Los volúmenes extraídos y movilizadas no podrán exceder lo planeado por cada lote, puesto que se evidenciaría sobreaprovechamiento o ingreso de materia prima sin certificados de trazabilidad. En caso contrario, se evidencia pérdida de material, robo o bajos niveles de producción. En ambos casos, los mapas permiten tener información para reducir los niveles de fraude o robo.
4. **Realizar un manejo sostenible del bosque.** Los planes de manejo realizados por finca se elaboran con una misma intensidad de corte o, en los casos donde se estratifican los guaduales, la información de cada rodal es ponderada de acuerdo a su tamaño para ser promediada y así obtener una sola cifra. La aplicación de la gestión de sitio específico para guaduales permite determinar con sensibilidad los índices de aprovechamiento para cada mata de guadua con base en el comportamiento de la especie en el terreno y, por tanto, permite que áreas con mayor capacidad productiva sean más intensamente trabajadas

sin detrimento de la sostenibilidad del guadual. Consecuentemente, crea límites de aprovechamiento a zonas que son de mayor fragilidad y/o menor productividad. La ordenación del guadual a este nivel permite otras consideraciones para obtener el máximo de eficiencia sin detrimento de la sostenibilidad, como la aplicación variable de fertilizantes o prácticas de manejo diferencial entre lotes.

5. Implantar sistemas electrónicos o semielectrónicos para la trazabilidad.

Una de las oportunidades al establecer un SIG, es la implantación de sistemas de codificación electrónicos o semielectrónicos (códigos de barra, códigos QR o etiquetas de RFID, entre otros) para la señalización e identificación de los lotes de guadua y/o las parcelas de muestreo. Cada código enlaza la posición de la parcela (y/o de los tallos) y la información recopilada en terreno, con las entidades del SIG (puntos, líneas o polígonos). La toma de datos se puede realizar con equipos digitales de mano (PDA con GPS) reduciendo errores y tiempos de ingreso de información al sistema; dichos instrumentos están en capacidad de grabar información en campo y transmitir vía inalámbrica (celular, Bluetooth o Wi-fi) los datos al SIG, con lo cual también se facilita la verificación de información por parte de los controles internos o externos, tanto en campo como a distancia. Cabe señalar que si bien el presente proyecto no realiza la experimentación con dichos equipos, sí brinda una revisión comparativa de las principales tecnologías disponibles en el mercado y señala cuáles pueden ser los dispositivos recomendados para la *marcación* de tallos y/o lotes de tallos de guadua para trazabilidad de información dentro de la cadena de custodia. Se realiza mención de algunos equipos de lectura para estos códigos, pero se excluye de la presente investigación un análisis exhaustivo de los equipos de lectura, transmisión y procesamiento de información.

6. Auditar los planes de manejo. Para las corporaciones autónomas y empresas certificadoras, la aplicación de un SIG y un sistema de trazabilidad electrónico o semi-electrónico, facilita la auditoría a los planes de manejo,

pudiendo verificar la existencia de las parcelas de muestreo y la reciprocidad entre los datos del sistema y la realidad del terreno. Consecuentemente, se facilita el flujo de información y coordinación entre propietarios y autoridades, así como con otros actores de la cadena (p.e. clientes, proveedores, etc.) generando transparencia y confianza en las relaciones, gracias a que se puede generar evidencias del cumplimiento de la reglamentación de ley y de los requisitos de la cadena de custodia, en el marco de sistemas de certificación forestal y/o procesos de exportación.

El presente trabajo emplea el SIG en la hacienda Maravélez (municipio de La Tebaida , Eje Cafetero colombiano), como una herramienta para elaborar de planes de manejo a nivel de finca (escala 1:1000) con un manejo específico por sitio, teniendo en cuenta la disponibilidad de materia prima en términos de cantidad y calidad. Estimaciones del total de culmos se realizan utilizando datos de campo para alimentar herramientas geoestadísticas. Se presenta un análisis costo-beneficio de diferentes alternativas tecnológicas de rastreo para la madera (dispositivos de marcación) para facilitar futuras decisiones.

2 Marco teórico

2.1 La guadua

2.1.1 Descripción general de la guadua

La guadua (*Guadua angustifolia* Kunth) es un bambú leñoso nativo que ha sido de gran utilidad desde épocas prehispánicas (Ilustración 1) en Colombia, Ecuador y Venezuela, aunque más recientemente ha sido introducida en varios países de Centro, Suramérica y el Caribe, e incluso en Norte América, Asia y Europa (Haridasan & Tewari, 2008; Londoño & Clark, 2004). Esta especie fue originalmente hallada a lo largo de las orillas de los ríos más largos de Colombia, Ecuador, Venezuela, las Guayanas, Brasil y Paraguay, pero sus poblaciones se han reducido en la mayoría de estos países (Hidalgo, 2003).

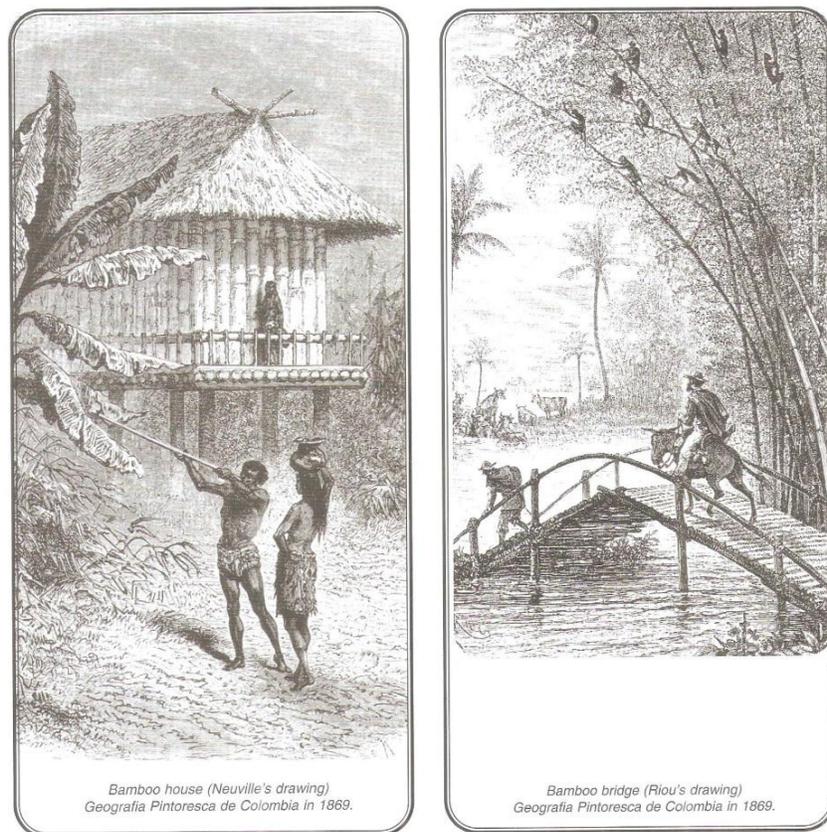


Ilustración 1. Evidencias del uso ancestral de la *Guadua*. Fuente: (Hidalgo, 2003)

Fue elemento fundamental para la construcción de más de 1000 poblaciones en el proceso de colonización del Eje Cafetero colombiano durante los siglos XVIII y XIX, entre las que se destacan Medellín, Pereira, Manizales, Armenia y Cali y donde emplearon la técnica del bahareque y la tapia pisada con guadua, dando resistencia y bajo peso a las construcciones (Foto 1) así como sismorresistencia ante los constantes movimientos telúricos de la región ubicada en el corazón de los Andes (Farbiarz, 2002; Londoño, 2011; Mosquera, 2002) .



Foto 1. Vivienda tradicional de la región del Eje Cafetero, construida estructuralmente con *Guadua*. (Foto: <http://www.ciudadviva.gov.co/febrero07/periodico/4/7big.jpg>)

Penetró en casi todos los ámbitos de la vida regional para ser utilizada en utensilios de cocina, instrumentos musicales, puentes, canaletas, acueductos, gallineros y diversidad de usos cotidianos (E. Arango, Mutis, Manzur, & Vélez, 1989). Ha inspirado poesías y composiciones musicales y es marca indeleble cuando se evoca el paisaje cultural cafetero (E. Giraldo & Sabogal, 2005).

La *Guadua* es un pasto gigante que pertenece a la familia botánica del arroz, la avena, la caña de azúcar y el bambú, entre otras muchas especies (más de 12.000 descritas) que contiene la familia de las gramíneas (Gramineae o Poaceae). De hecho, la guadua se clasificó taxonómicamente como parte de la subfamilia Bambusoidea, que incluye tanto bambúes herbáceos (tribu Olyrae),

como bambúes leñosos (tribu Bambuseae). La tribu Bambuseae contiene 9 subtribus, 3 de las cuales son endémicas de América: Arthrostylidinae, Chusqueinae y Guadinae (Londoño & Clark, 2004). El género *Guadua* reúne aproximadamente 30 especies que crecen naturalmente desde México hasta la Argentina, excepto en Chile y en el Caribe, sin embargo en esta última región, *G. angustifolia* fue introducida en las islas de Puerto Rico, Cuba, Haití y Trinidad (Londoño & Clark, 2004).

El género se caracteriza por tener rizomas fuertes del tipo paquimorfo (Ilustración 2), culmos rectos, gruesos, huecos y arqueados apicalmente, lignificados, con alturas que oscilan entre 7 y 20 m y diámetros entre 5 y 19 cm y brotes nuevos protegidos por hojas especializadas llamadas hojas caulinares (Londoño & Clark, 2004). *Guadua angustifolia* es especialmente apreciada por las propiedades físico-mecánicas de sus tallos, que le han otorgado un lugar entre las 20 especies prioritarias en el mundo con potencial de desarrollo (Castaño & Moreno, 2004). Presenta un alta relación resistencia-peso ($350\text{-}500\text{ kg/cm}^2$) que excede a la mayoría de las maderas y puede incluso ser comparada con el acero (Takeuchi, 2004). Los tallos de esta planta pueden alcanzar los 30 m de altura y los 25 cm de diámetro. La densidad promedio de culmos, en núcleos forestales de alta y media productividad es de 5000 a 8000 tallos (Camargo, Dossman, Cardona, García, & Arias, 2007). Su productividad es muy superior a la de varias especies forestales: mientras una especie de pino genera anualmente entre $25\text{-}30\text{ m}^3$ de madera por hectárea, con ciclos de corte de 20 años, la guadua produce entre 40 y 80 m^3 en ciclos de 18 a 24 meses (Mejía & Moreno, 2013).

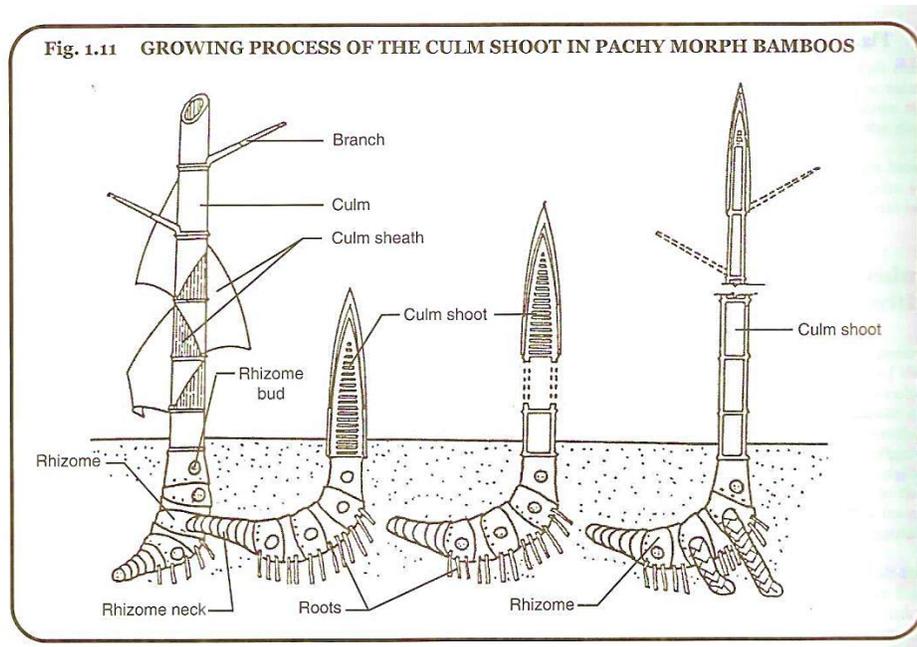
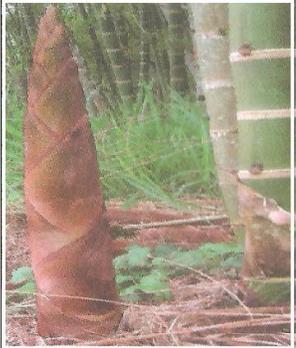
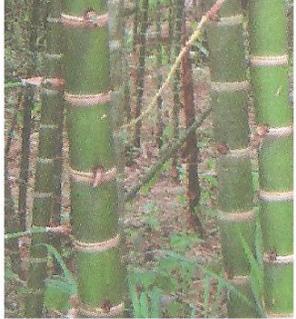


Ilustración 2. Bambú de crecimiento paquimorfo. Partes de la guadua. Fuente: Hidalgo, 2003.

Su rápido crecimiento vertical, con registros de hasta 21 cm al día, le permite alcanzar en 6 meses el dosel del bosque y necesita de 4 a 5 años para llegar a su estado de madurez. Su madurez, momento en que presenta las mejores propiedades físico-mecánicas, se define por el grado de lignificación y endurecimiento y no por el incremento del diámetro como ocurre con las especies forestales tradicionales que sí presentan cambium vascular (Camargo & Rodríguez, 2011; Hidalgo, 2003). Por lo anterior es fundamental marcar la guadua en el momento en que emerge, para tener el registro de su edad y evitar los criterios subjetivos que hoy en día son empleados para seleccionar el material maduro (ver Tabla 1).

Tabla 1. Características de los diferentes estados de madurez de los culmos de guadua. Fuentes (Camargo & Rodríguez, 2011; Henao & Rodríguez, 2011; Martínez, Ríos, & Niño, 2011). Fotos: Camargo & Rodríguez, 2011

Ilustración	Estado de desarrollo
	<p>Renuevo: inicia desde que emerge el nuevo culmo hasta que alcanza su elongación máxima. Los renuevos están protegidos por hojas caulinares y no han desarrollado otro tipo de follaje. Edad: 0 a 17 meses (máximo 20).</p>
	<p>Jóvenes / Verdes: se inicia cuando las hojas caulinares comienzan a caer. El color de los culmos es verde intenso y se inicia el desarrollo de ramas y follaje. Edad: 18 a 33 meses.</p>
	<p>Maduros: este estado se caracteriza por el cambio del color del culmo de verde intenso a verde opaco, tornándose gris a medida que líquenes y hongos crecen sobre su superficie. En este estado el culmo está disponible para ser cosechado. Edad: 30 a 53 meses</p>
	<p>Sobremaduros: los culmos comienzan a decaer y líquenes rosados aparecen en su superficie. Estos culmos también pueden ser cosechados con fines comerciales. Edad 55 a 88 meses.</p>

	<p>Secos: los culmos se tornan amarillos y las ramas y hojas se secan. Este es el último estado de madurez y posteriormente los culmos mueren. No presentan valor comercial. Edad >88 meses.</p>
---	---

Crece entre los 700 y los 2000 msnm, pero la mejor calidad se reporta ([Camargo, Dossman, et al., 2007](#); [García & Camargo, 2011](#)) en terrenos fértiles y bien drenados entre los 1300 y los 1500 msnm, con precipitaciones que oscilan entre 1200 y 2000 mm por año y temperaturas entre 20 y 26°C. Se adapta bien en el bosque tropical con niveles de precipitación entre 1300 y 5000 mm/año, pero no bajo condiciones menores a 1100 mm año⁻¹ puesto que limita su crecimiento.

Los guaduales son comunidades vegetales en las cuales domina la especie guadua y se caracterizan por tener una composición florística variada ([Ospina, 2002](#)). Se han documentado 63 especies diferentes de plantas cuyo diámetro a la altura del pecho (DAP) es mayor a 10 cm y 182, con DAP de 1-10 cm. Además, 21 de vertebrados (16 mamíferos y 5 reptiles) y 188 de aves ([Ospina, 2005](#)). Algunas especies son árboles maderables muy valiosos que requieren del sombrío de los guaduales para su germinación y crecimiento, así mismo, algunas flores comerciales como las heliconias, son abundantes en los guaduales naturales. Las terrazas aluviales favorecen la diferenciación en la riqueza de especies. Estos ecosistemas representan gran parte de la vegetación que queda en la región y son importantes escenarios para la conservación.



Foto 2. Diversidad florística de los guaduales. Foto: Jairo Caro©

2.1.2 Bienes y servicios ambientales

Los bienes y servicios ambientales que prestan los bosques de guadua, es tema de creciente importancia por los cambios en el uso del suelo y el deterioro ocasionado por las actividades antrópicas. Son muchos los esfuerzos realizados en términos de investigación de la biodiversidad, que han determinado la calidad y la cantidad de los beneficios que prestan estos ecosistemas, donde la guadua hace parte de la matriz del paisaje de forma no exclusiva: “si bien la guadua es el elemento de gran importancia funcional en este paisaje (...), para optimizar la generación de bienes y servicios ambientales en las áreas restauradas es fundamental asociar a la guadua con un amplio número de especies” (Calle & Méndez, 2009).

Entre los principales bienes y servicios que ofrece la guadua, están la protección de suelo y la regulación hídrica (Rodríguez & Camargo, 2009; Zuluaga, Giraldo, & Chará, 2011), la conservación de la biodiversidad (Calle & Méndez, 2009; Fajardo,

Johnston-González, Neira, Chará, & Murgueitio, 2009; Ospina & Finegan, 2004; Ospina & Rodríguez, 2002) y la fijación de Carbono (A. M. Arango, 2011; Riaño, Londoño, López, Gómez, & Camayo, 2002). Caro y Mejía (2013) presentaron una revisión de literatura con una cantidad importante de trabajos relacionados con bienes y servicios ambientales de la guadua, para Colombia, así como sobre otros temas.

Finalmente cabe destacar que, la restauración de taludes por el método de bioingeniería, ha utilizado a la guadua como elemento fundamental para combatir el deterioro de suelos andinos, con resultados muy favorables (Calle, Henao-Gallego, Giraldo, & Armbrecht, 2013; Rivera-Posada, Sinisterra, & Calle, 2007; Rivera-Posada, 2011).

2.1.3 Beneficios económicos

La guadua es el bambú nativo de mayor importancia en el país. Es un excelente recurso renovable de rápido crecimiento que brinda beneficios económicos, sociales y ambientales a las comunidades rurales que la rodean.

En Colombia se estima que existen 36.181 hectáreas de bosques de guadua, de los cuales 4.892 ha son plantados y 28.000 están en el Eje Cafetero (Castaño & Moreno, 2004; Kleinn & Morales-Hidalgo, 2006). Entre 1993 y 2002, la guadua generó recursos por un valor estimado de 8.611 millones de pesos, lo cual corresponde aproximadamente a la comercialización de 12,3 millones de piezas comerciales (Colombia - Ministerio de Agricultura y Desarrollo Rural, 2005). En 2012, las corporaciones indican que se aprovecharon 2.376 ha de guadua en la región del Eje Cafetero y norte del Valle del Cauca, con ventas que alcanzaron los 3.977 millones de pesos (Mejía, 2013).

En el escenario global, la fabricación de productos de bambú genera una oferta de más de 1.500 productos que mueven alrededor de US\$7.000 millones, de los cuales, 6.000 millones corresponden al comercio mundial de productos

provenientes de la China. Colombia ocupa la vigésima novena posición como socio comercial europeo para los productos de bambú, aunque represente sólo el 0,01% de las importaciones totales (CSIL, 2010; Mejía, 2013).

Las principales líneas de negocio que se avizoran para el mercado de la guadua son: a) líneas de negocios en sistemas constructivos; b) líneas de negocios en servicios ambientales y bioingeniería con guadua; y, c) líneas de negocio en el uso de la biodiversidad y de los subproductos de la guadua para el desarrollo de productos farmacéuticos y medicinales, denominados de clase mundial (Mejía & Moreno, 2013; Mejía, 2013).

2.2 Plan de manejo y aprovechamiento de guadua

El plan de manejo y aprovechamiento forestal es el documento base que se presenta ante una corporación autónoma regional para ser evaluado por los técnicos de la entidad y es el requisito básico para asegurar la legalidad del aprovechamiento de guadua. Para elaborar este plan de manejo, el asistente técnico debe guiarse por los términos de referencia de la norma unificada (Camargo, Morales, & García, 2008) donde puede encontrar las especificaciones técnicas para el aprovechamiento comercial de bosques de guadua. Un aprovechamiento de menos de 500 tallos (50 m^3) por ciclo de corte (18-24 meses) no requiere la elaboración de un plan de manejo, es de tipo *doméstico* y la autoridad ambiental realiza el reporte técnico. Cuando el objetivo es obtener más de 500 tallos, el plan de manejo es obligatorio y es denominado tipo II o persistente.

Un asistente técnico forestal debe elaborar el documento que contiene: a) introducción, b) objetivo del aprovechamiento; c) generalidades del predio; d) diseño de la parcela y cálculo de la intensidad de muestreo; e) inventario forestal; f) procesamiento de datos; g) cálculo de error; y, g) definición del plan de manejo.

El uso de imágenes satelitales, GPS y herramientas SIG no está descrito en la norma unificada, pero tampoco limita dicho uso. De hecho, esta es flexible a añadir nuevos aspectos.

2.3 Tecnologías de manejo específico por sitio

La administración o gestión por sitio específico es una tecnología que se emplea desde hace mucho tiempo y tiene por propósitos, mejorar la productividad del cultivo, el desempeño ambiental y reducir los costos de producción, a partir de observar, registrar, analizar y tratar la variación presente en el cultivo: diferencias en las propiedades físicas o químicas del suelo, diferencias de cantidad y calidad de la producción, variaciones en el manejo, entre otros (Mulla, 2013). Los datos registrados son comúnmente almacenados en sistemas de información geográfica, que permiten un nivel de precisión alto y la posibilidad de incorporar gran cantidad y variabilidad de información para análisis de diferente propósito (correlación de precipitación y productividad, calidad de suelos y calidad de productos, imágenes satelitales y plagas, etc.). De tal suerte que, se toman decisiones específicas para cada región del terreno de acuerdo a la información analizada. Más aún, hay métodos que combinan el uso de sistemas de información geográficos con sensores en tiempo real, realizan lectura de algunas variables en el cultivo como humedad, penetración del suelo, otros, y realizan el tratamiento al instante (p.e. aplicación de insumos con dosificación variable). Registrar esta información tiene un propósito adicional: demostrar la calidad y el origen los productos y procesos, bajo criterios de sustentabilidad ambiental, económica y social.

En los siguientes párrafos se define el concepto de manejo específico por sitio, tomando como base el trabajo a nivel agrícola, para entender desde esa experiencia, cómo es el trabajo a nivel específico para los bosques; concluye dicha sección mencionando cuáles son las principales condiciones para la realización de un manejo específico por sitio. Luego, se presentan algunas aplicaciones en la administración de sitio específico desde el enfoque por mapas y por sensores y, se explica, brevemente, su importancia en los procesos de

gobernanza forestal. La siguiente sección es una revisión de los métodos para la identificación de productos dentro la cadena de custodia, entre los que se destacan métodos convencionales de marcación (pintura, códigos de barra, tags de RFID) hasta métodos de identificación por marcadores moleculares y nanopartículas. Finalmente, se describe el estado actual del tema de guadua en términos de manejo del bosque y de marcación de los tallos para procesos de trazabilidad.

2.3.1 Manejo específico por sitio para la agricultura y los bosques

Antes de que la agricultura fuera mecanizada y grandes extensiones de tierra fueran fertilizadas y manejadas de manera homogénea para su producción, los agricultores trataban las diferencias del suelo y del cultivo de forma artesanal y cuidadosa (N. Zhang, Wang, & Wang, 2002). Desde la era industrial, los desarrollos mecánicos y tecnológicos han separado la relación directa del campesino con el cultivo, reduciendo el esfuerzo y estandarizando las aplicaciones de insumos a tasas más uniformes. Las prácticas culturales y la aplicación uniforme de agroinsumos en el terreno ha conducido a un manejo ineficiente del mismo, en tanto que las necesidades específicas de cada sector son manejadas con dosificaciones inadecuadas que generan impactos ambientales, pérdidas económicas y consecuencias en la salud de las personas.

Con el paso de los años, se ha hecho evidente que el manejo desproporcionado de fertilizantes y el tratamiento uniforme de grandes extensiones presenta desventajas. Un mejor desempeño del cultivo se logra a partir de la aplicación de tratamientos diferenciados, de acuerdo a las necesidades de cada zona del terreno y, gracias a ello, lograr productos de calidad diferenciada en cada sector (Läderach et al., 2011).

La agricultura de precisión es el manejo de la variabilidad espacial y temporal en el cultivo, para tomar decisiones y mejorar la productividad, la calidad del producto y reducir el impacto ambiental (Blackmore, 2007); incluye unas mejores prácticas de

manejo en campo, tales como el manejo adecuado de fertilizantes, herbicidas, semillas, entre otros. El cultivo es dividido en zonas de manejo y la dosificación es específica de acuerdo a los tipos de suelo, la posición en el paisaje y la historia de manejo (Mulla, 2013). La agricultura de precisión se beneficia de varias tecnologías, incluyendo los sistemas de posicionamiento global (GPS), los sistemas de información geográfica (SIG), las imágenes de satélite, los sensores remotos, la nanotecnología, la automatización, la computación móvil, las telecomunicaciones y el procesamiento de información avanzada (N. Zhang et al., 2002). El uso de la tecnología pretende devolver la administración del campo al momento en que el agricultor tenía la oportunidad de monitorear el progreso de cada parte del cultivo (Plant, 2001).

La agricultura por sitio específico (AES) estudia la variabilidad de campo entre lotes, mientras que la agricultura de precisión estudia las diferencias dentro de cada lote, siendo este un nivel de detalle mayor (Cock & Jiménez, 2011). Este concepto se puede aplicar al manejo forestal.

En cuanto a bosques, la explotación intensiva de grandes extensiones forestales y la tala rasa, que da paso a la agricultura o a la ganadería, fue el comportamiento predominante hasta mediados del siglo XX, sin consideración de las consecuencias ambientales que este tipo de extracción genera (Burger, 2009).

En el sentido más simple, el manejo forestal es la realización de actividades para alcanzar una cierta clase, cantidad y tasa de productos y servicios del bosque. Los productos y servicios aprovechados varían de acuerdo al grado de complejidad -y evolución- del aprovechamiento forestal en el tiempo. En los inicios de la actividad se realizaba solamente explotación de madera, hoy en día, se valoran además los bienes y servicios ambientales del bosque, tales como, refugio de conservación, fijación de carbono, regulación hídrica y producción de productos no forestales, entre otros (ver Gráfico 1). La obtención de bienes y servicios del bosque requiere de mayor nivel de comprensión del área forestal. Adicionalmente, para maximizar

productos y servicios al nivel de lote y de paisaje, se requiere de un manejo preciso que no dista mucho de las tecnologías de precisión utilizadas en la agricultura intensiva (Burger, 2009).

El manejo forestal de precisión representa un paso más en el manejo de la complejidad comparado con el manejo integral e intensivo empleado en las últimas décadas a nivel forestal. Comparte algunos componentes de la agricultura de precisión, pero varía en la virtud de las operaciones y los objetivos. Taylor (citado por Burger 2009) lo define como la planificación y operación de actividades de manejo en sitio-específico para mejorar la calidad y el uso de los productos forestales, reducir los desperdicios e incrementar las ganancias, así como sostener la calidad ambiental; emplea tecnologías de SIG y GPS para mejorar la eficiencia operacional mediante la aplicación de tratamientos a nivel de sublotes. Con el uso de Lidar (Light detection and ranging), puede llegar a realizar el seguimiento del crecimiento y la producción a nivel de cada árbol (Burger, 2009).

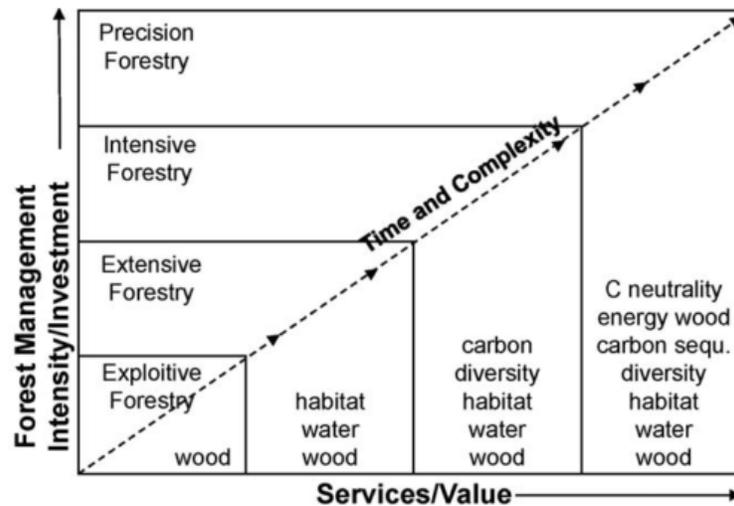


Gráfico 1. Intensidad de manejo y nivel de inversión que se debe practicar en la administración del bosque en función de los productos a obtener. Fuente (Burger, 2009).

Plant (2001) señala tres criterios que deben ser satisfechos para justificar la aplicación de manejo por sitio específico: 1) que exista variabilidad espacial significativa dentro del campo en factores que influyan en la producción del cultivo;

2) que las causas de variabilidad puedan ser identificadas y medidas; y, 3) que la información de estas mediciones pueda ser utilizadas para modificar patrones de manejo en el cultivo para incrementar el beneficio o reducir el impacto ambiental.

2.3.2 Enfoques de manejo basado en mapas y en sensores

La variabilidad en el terreno y en el cultivo puede ser estudiada usando dos enfoques, el enfoque a partir del uso de mapas o a partir del uso de sensores.

El enfoque de mapa requiere el uso de GPS, sensores remotos, muestras de suelo, estudios de laboratorio y monitoreo de campo para generar un mapa de aplicación variable o de intensidad / frecuencia de cosecha (N. Zhang et al., 2002). En el valle del río Cauca en Colombia, Cenicaña ha trabajado desde 1980 en actividades tendientes al manejo específico por sitio para el cultivo de la caña de azúcar utilizando estudios semidetallados de suelos (1:10.000) para las 220.000 ha de cultivos que hay en la zona. La información recopilada les permite describir la variabilidad de los suelos a nivel del lote, donde se logran encontrar dos y tres grupos de suelos diferentes en el 67% de estos. Cenicaña genera mapas de variabilidad de suelos empleando semivariogramas, mapas de variabilidad climática y mapas donde se analiza la variación espacio temporal de la producción, entre otros (Erazo, 2011). Niederhauser y colaboradores (Niederhauser, Oberthür, Kattinig, & Cock, 2008) documentan las variables y los factores de calidad de suelos de cafés especiales, empleando agricultura específica por sitio, en una base de datos georreferenciada y en línea, donde los clientes pueden seleccionar las características de taza y valores simbólicos (conservación y sellos de certificación social, otro).

Por otra parte, la tecnología basada en sensores mide variables específicas como propiedades del suelo o de las plantas en tiempo real, para realizar aplicaciones inmediatas en respuesta a la lectura realizada (N. Zhang et al., 2002). Peets y colaboradores (Peets, Mouazen, Blackburn, Kuang, & Wiebensohn, 2012) señalan que los métodos convencionales son más costosos, demorados y solo son

funcionales para unas muestras del terreno, mientras que las tecnologías en tiempo real “on the go” son más rápidas, costo-efectivas y amigables con el ambiente. Los sensores en tiempo real utilizan alguno de los siguientes métodos (Adamchuk, Hummel, Morgan, & Upadhyaya, 2004):

- a) Sensores eléctricos y electromagnéticos para medir la resistencia/conductividad, capacitancia o inductancia eléctrica, afectada por la composición de la muestra de suelo. Usualmente de rápida respuesta, bajo costo y alta durabilidad, estos sensores permiten obtener datos sobre textura, salinidad, materia orgánica, contenido de humedad, principalmente.
- b) Sensores ópticos o radiométricos que usan ondas electromagnéticas para detectar el nivel de energía absorbida /reflejada por las partículas del suelo. Han sido empleados para medir mediante espectrofotometría, humedad, materia orgánica, tamaño de las partículas, óxidos de hierro, composición mineral, sales solubles, material parental y otros atributos afectados por la reflectancia del suelo.
- c) Sensores mecánicos que miden la fuerza resultante de una herramienta en contacto con el suelo, y con el uso de un penetrómetro, miden la compactación.
- d) Sensores acústicos que cuantifican el sonido por una herramienta que interactúa con el suelo y junto con los sensores neumáticos, permiten obtener información sobre textura del suelo y compactación.
- e) Sensores neumáticos que evalúan la habilidad de inyectar aire en el suelo
- f) Sensores electroquímicos que usan membranas de iones-selectivos y que producen una salida de voltaje en respuesta a la actividad de iones como H^+ , K^+ , NO_3^- , Na^+ , etc. Este tipo de método es rápido y eficiente y podría ser empleado para obtener los niveles de nitrato y potasio en el suelo a partir de datos de pH.

2.3.3 Manejo sostenible de bosques

Imaginemos por un momento que el plan de manejo y aprovechamiento del bosque se elabora bajo los términos de la norma unificada y cumple con las especificaciones técnicas y legales. Adicionalmente, se realiza la caracterización cuidadosa de las variables del terreno, se conocen los sectores del cultivo y la calidad de sus materiales y, por lo tanto, se tiene conocimiento sobre las calidades disponibles. ¿Cómo demostrar que el material es legal, ambientalmente sostenible y además, cumple con los requisitos de calidad que exige el comprador?

Los negocios hoy en día se enfrentan a la globalización, a la competitividad y a un mercado cambiante. La cadena de suministro es una realidad que exige retos y cambios en la forma de hacer los negocios. La cadena de suministro está definida por los procesos del ciclo de vida de un producto y comprende los flujos físicos, de información, financieros y de conocimiento, para satisfacer las necesidades del usuario final con productos y servicios determinados (Tzoulis & Andreopoulou, 2013). Penetrar en mercados globales exige legalidad, sostenibilidad y calidad, y, por lo tanto, un certificado que evidencie que el producto o servicio cumple con dichos parámetros.

En Colombia se vienen desarrollando acciones tendientes al manejo sostenible de bosques con énfasis en guadua, para apoyar las acciones intergubernamentales que propenden por la gobernanza forestal en Colombia, cristalizadas en la firma del pacto por la madera legal (Cardesa et al., 2010). Resultados de esta iniciativa son los estándares para la certificación voluntaria para guadua creados entre 2003 y 2006, y verificados posteriormente en 2011 (Grupo de trabajo para la Certificación Forestal Voluntaria en Colombia, 2007, 2012), con el propósito de que administradores y/o propietarios reúnan los requisitos para demostrar que sus operaciones cumplen objetivos sociales, ambientales y económicos. Los estándares para procesos de certificación siguen un listado de principios (lista de chequeo) que conducen o no a la certificación en manejo forestal sostenible. Existe también la certificación en *cadena de custodia*, en cuyo caso se verifica que el

producto final ha sido elaborado con materias primas obtenidas responsablemente. Esta última certificación es para empresas que fabrican, procesan y comercializan productos forestales maderables y no maderables, e involucra toda la cadena productiva forestal desde el inventario forestal, las operaciones de tala, transporte, aserrío, transformación y finalmente, comercialización.

La implementación de un SIG, apoyado en imágenes satelitales y tecnología de GPS, facilita la actividad del productor y/o administrador del gradual mediante la diferenciación, cuantificación y verificación del origen y de la calidad de los tallos de guadua, reuniendo las evidencias para el proceso de certificación en manejo forestal responsable. El papel del SIG es ofrecer un medio para modelar la población de guadua y registrar el movimiento de la madera que se extrae por lote en cada aprovechamiento.

2.3.4 Tecnologías empleadas para la marcación

Los atributos de calidad y de origen de la madera deben estar compilados en un sistema de trazabilidad que controle los movimientos físicos de la madera y/o sus productos en toda la cadena de custodia (CdC) desde la extracción hasta el cliente final (Dykstra et al., 2002; Seidel, Fripp, Adams, & Dentry, 2012). La trazabilidad es la habilidad de recuperar la historia de uso y localización de un artículo o una actividad, a través de registros de identificación, empleando sistemas de computación que brinden una identificación única a la madera o a los lotes de producto (Tzoulis & Andreopoulou, 2013).

Es importante señalar que, en aras de cubrir concretamente los objetivos planteados en el trabajo, se excluyen de la revisión de literatura los equipos portátiles de lectura (hand-held), terminales, antenas, y en general, otros tipos de hardware y software que acompañan los sistemas de trazabilidad y su documentación. Estos elementos, fundamentales y complementarios en un

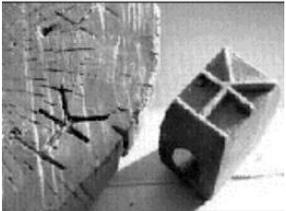
sistema de trazabilidad, se pueden consultar en detalle en la literatura ([Dykstra et al., 2002](#); [Seidel et al., 2012](#)).

Una primera aproximación divide el proceso de marcación entre: balance de masas y marcación individualizada. Un segundo nivel es el dispositivo empleado para su marcación.

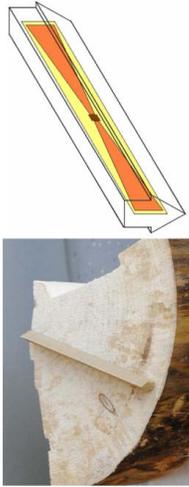
El balance de masas o método de inventarios, controla los movimientos de entrada, salida y acumulación de material, sin un identificador físico individualizado. Con este método se lleva control del lote completo. Tiene la ventaja de incluir productos de dimensiones pequeñas dentro de los lotes trazados, su costo es bajo, pero presenta riesgos de ingreso de productos no autorizados ([Seidel et al., 2012](#)).

Tanto la identificación individualizada de productos, como la marcación por lotes, se pueden llevar a cabo mediante dispositivos de marcación externos o, mediante firmas internas (ver más adelante). La marcación externa permite llevar un control de cada producto y transmitir las características registradas; incrementa los costos de operación y consume tiempo en la marcación. Los principales dispositivos para la identificación física de productos son (tabla 2):

Tabla 2. Métodos físicos de identificación de maderas. Fuentes (Dykstra et al., 2002; Seidel et al., 2012; Tzoulis & Andreopoulou, 2013). Ilustraciones: (Björk et al., 2011; Dykstra et al., 2002; Seidel et al., 2012)

Método	Descripción	Ventajas	Desventajas	Ilustración
Marcado con pintura	Es el método más antiguo donde se pinta la información de la compañía o del producto. Se emplea pintura de aceite por lo general. Se usan conjuntamente con documentación impresa.	Bajo costo, fácil aplicación, durabilidad. No requiere entrenamiento. Robusto ante diferentes ambientes. Los materiales son fácilmente adquiribles en cualquier lugar.	Requiere mucha mano de obra y tiempo. Presenta errores de lectura y de marcación. Puede falsificarse.	
Talla con martillo	Emplea un martillo con una talla para dejar una huella con el impacto. Se usa para firmar el custodio de la madera y debe ir acompañada de registros impresos.	Fácil y rápido proceso de marcación. Bajo costo. La marca resiste diferentes condiciones climáticas. Puede usarse combinado con otros métodos.	Difícil lectura. Fácilmente duplicables sin autorización. Son para marcación individualizada. No se asocia con un registro documental.	
Etiquetas de código de barra o códigos QR	Elaboradas con plástico, papel o metal, suelen ir adheridas o clavadas y llevar impresos o grabados los códigos de barra (o códigos bidimensionales QR que guardan mayor información).	Bajo costo, fácil aplicación. Números individualizados evitan duplicación. Se pueden registrar varios datos. Número escaneable con equipo electrónico. Fácil transferencia de datos empleando equipos de lectura.	Falsificables. Fácilmente removibles. Dificultades de lectura en condiciones de barro, humedad o suciedad. No pueden ser elaboradas en campo y eso impone algunas limitaciones de información.	

Método	Descripción	Ventajas	Desventajas	Ilustración
Etiquetas tipo puntilla	Etiquetas tipo puntilla son clavadas en los productos de madera. Elaboradas de plástico o metal, normalmente son impresos códigos de barra en la cabeza o son colocados tags de RFID (en su interior).	Mucho más robustas que etiquetas plásticas o de papel. Aplicación relativamente simple. Fácil lectura e integración a sistemas de inventario. Almacena gran cantidad de datos. Difícilmente duplicable.	Deben ser removidas en los procesos de transformación. Difíciles de remover. Los proveedores de este tipo de etiquetas no son comunes. Difícil lectura en condiciones de barro, humedad o suciedad. Presenta restricciones de información puesto que las puntillas deben venir listas. Requiere equipos sofisticados de lectura.	
Tarjetas magnéticas y tarjetas inteligentes	Pueden ser de plástico o papel. Contienen una banda magnética, o un microchip, que puede guardar, suministrar o procesar información, como las tarjetas de banco.	Funcionales para adjuntar información. Brindan seguridad a la información (aunque no totalmente).	No son para marcación individual. Las elaboradas en papel son poco robustas. Más costosas que código de barras.	

Método	Descripción	Ventajas	Desventajas	Ilustración
Identificadores de radio frecuencia – RFID	Etiquetas con receptores y emisores de radio frecuencia para enviar y/o recibir datos. El dispositivo lector no requiere contacto directo. Las distancias de lectura varían de mm a varios metros. Los RFID pueden ser pasivos o activos. En el primer caso solo envían información cuando recibe la señal apropiada de un lector. Se emplea en tarjetas o diferentes dispositivos (incluso en puntillas)	Lectura de múltiples identificadores es rápida y puede ocurrir bajo condiciones ambientales difíciles (incluso agua). Contiene gran volumen de información. Transferencia inalámbrica de datos. Difícilmente falsificable. Diferentes formas y tamaños. Se transfiere y puede capturar más información durante la CdC.	Método costoso. Requiere personal capacitado y equipos. El costo de establecimiento es alto, los métodos de escaneo de etiquetas RFID son costosos y requieren de programación. No hay forma de lectura manual si el sistema falla.	
Pintura con microtaggants de nanopartículas	Nanopartículas compuestas por distintas capas de color. Cada microtag tiene varias capas, con codificación de color que incluye una capa fluorescente y una magnética. Esto le permite funcionar como un identificador codificado y se pueden realizar múltiples permutaciones de color.	Seguras, no pueden ser duplicadas. Bajo costo relativo. Se pueden acoplar a diferentes elementos (pintura, etiquetas, hilo, etc.) y a toda clase de productos en la CdC. Es durable y puede sobrevivir a diferentes procesos. La emisión de un rayo, hace visibles características invisibles.	Solamente se puede utilizar para la marcación por lotes. No se pueden leer electrónicamente (hasta el momento), solamente de forma manual. Costos iniciales altos.	

Por otra parte se encuentra la identificación de firmas internas: químicas y/o genéticas (Dykstra et al., 2002; Seidel et al., 2012). Son métodos muy seguros y se pueden realizar en cualquier punto de la cadena de suministro. Llegan al nivel de individuo y brindan información relacionada con la calidad del sitio y propiedad de la madera.

En el método químico se encuentran las pruebas isotópicas de elementos de diferente masa molecular que pueden analizarse con espectrómetro de masas. Las plantas toman diferentes elementos químicos a través del agua (H, O), en la nutrición del suelo (S, Sr, N) y en la fotosíntesis (C, N). Estos elementos isotópicos, al ser caracterizados en cada región, pueden arrojar el certificado de origen para un producto (Seidel et al., 2012; Havard 2007, en Sheikha, Chalier, Zaremski, & Montet, 2013; von Scheliha & Zahnen, 2011).

A nivel genético, el ADN de los árboles tiene regiones que tienen alta variación dentro de individuos de una misma especie (von Scheliha & Zahnen, 2011); estas partes del genoma donde se observan estas variaciones se conocen como microsatélites. La composición genética de una población de árboles presenta un patrón espacial, que a su vez, está afectado por diferentes sucesos histórico-evolutivos (glaciaciones, extinciones, factores limitantes de la dispersión, otros). Este patrón en las secuencias del ADN es identificable gracias a una correlación de las diferencias genéticas y las distancias espaciales entre poblaciones. Para un paisaje determinado, el patrón genético puede ser caracterizado empleando muestreos de vegetación en puntos específicos. El origen de la madera puede ser controlado mediante comparación del genotipo de una muestra, con los patrones de las muestras tomadas en las poblaciones naturales (von Scheliha & Zahnen, 2011). Dykstra (Dykstra et al., 2002) señala como debilidades del método, la necesidad de construir bases de datos para el genoma de las diferentes especies y de sus poblaciones; dichas bases de datos no existen para la mayoría de las especies comerciales y las pruebas de laboratorio requieren alto nivel tecnológico y recursos económicos.

2.3.5 Manejo por sitio específico para guadua

Con base en lo anterior, se evidencia que el material guadua es un recurso renovable con enormes potencialidades y posibilidades para el mercado nacional e internacional; existen herramientas para una gestión del bosque diferenciada (manejo forestal por sitio específico) y técnicas para la marcación de la madera para mejorar la producción, reducir el impacto ambiental y asegurar la calidad a lo largo de la cadena de custodia.

Algunos estudios han identificado terrenos (tipos de suelos, pendientes, cercanía a fuentes de agua) con mejor calidad de sitio para las actividades forestales, lo que ha permitido determinar intensidades y ciclos de corte más adecuados para la sostenibilidad del guadua, y reconocer dónde crecen y cuáles son las calidades de guadua que están demandando diferentes mercados ([Camargo, Morales, & Ospina, 2002](#); [García & Camargo, 2011](#); [García, 2004](#))

Importantes avances se han realizado en la aplicación de sistemas de información geográfico a nivel regional: imágenes de satélite han sido empleadas para el inventario de guaduales ([Bernal, 2002](#); [Camargo, Dossman, et al., 2007](#); [Kleinn & Morales-Hidalgo, 2006](#)) y se ha empleado esta información para obtener de manera indirecta, una estimación del número de tallos y las toneladas de carbono que secuestran los guaduales por hectárea ([Kleinn & Morales-Hidalgo, 2006](#)). Se ha realizado la evaluación del uso del suelo (a escala 1:10.000) de áreas actuales y potenciales para la producción de guadua, diferenciando niveles de productividad e identificando núcleos forestales potenciales en la región cafetera ([Camargo, Dossman, et al., 2007](#)).

La literatura señala que los tallos con mayores diámetros (medidos en el internodo a la altura del pecho), más largos y con paredes más gruesas, se encuentran ubicados en guaduales entre 1200 y 1500 msnm con pendientes suaves (0-10°) y temperaturas entre 19,7° y 22,5°C. Mayor densidad de tallos y mayor dureza de los culmos, es común en lugares donde la pendiente es mayor (20-30°); estos

lugares presentan suelos con baja densidad aparente y alto contenido de aluminio (Camargo, Dossman, et al., 2007; García, 2004). Algunos autores (Camargo et al., 2002; García, 2004; Gritsch et al., 2004) han caracterizado la calidad de los sitios e identificado variables del terreno en relación con las propiedades mecánicas de los tallos. García y Camargo (García & Camargo, 2011) describieron 3 clases de calidad de sitio de acuerdo a altitud, temperatura y factores de suelo. También obtuvieron datos sobre las mejores condiciones de sitio para los tallos requeridos en mercados especializados de construcción, artesanías y muebles. La microzonificación de los guaduales para análisis de sitio se realiza actualmente en Risaralda (Suarez, comunicación personal). Dichos estudios dan un marco de trabajo al enfoque sitio-específico para guaduales.

2.3.6 Marcación para la trazabilidad de productos de guadua

La edad de la guadua es el punto más crítico que debe ser trazado para certificar o asegurar su calidad (Henao & Rodríguez, 2011; Perea, Villegas, Cerquera, & Cortés, 2003) en tanto que define si el material cumple con las condiciones físico-mecánicas para ser empleado en construcción; en caso contrario, se pone en riesgo la obra y por lo tanto, la vida de personas.

La única evidencia de trazabilidad que se ha documentado para este proceso, es la marcación con pintura: los renuevos emergentes son pintados cada seis meses, dando un color característico a cada semestre (para un total de 8 colores), lo que permite identificar los tallos que cumplen con el tiempo exigido para ser cosechados (Rodríguez, Camargo, & Franco, 2011). En dicho estudio se compararon el uso de pintura, marcadores de tinta y placas de aluminio. Los mejores resultados fueron los obtenidos con pintura. Procesos posteriores de la logística forestal no han sido documentados en la literatura para el tema de guadua.

Lo más evidente es que no hay prácticas de marcación en el tema de guadua y es, precisamente, una de las mayores debilidades del sector.

2.4 Análisis geoestadístico

Para realizar propuestas de manejo específico por sitio, los investigadores se apoyan en herramientas geoestadísticas que les permiten predecir el comportamiento de la población estudiada de acuerdo a las variables seleccionadas. La geoestadística -una de las áreas del análisis espacial de datos- emplea muestras de diferentes lugares para crear (interpolan) una superficie continua (Clark, 1979; R. Giraldo, 2002; Johnston, Ver Hoef, Krivoruchko, & Lucas, 2003). Diversas áreas del conocimiento como la minería (Clark, 1979), el estudio de suelos para la agricultura (S. Zhang et al., 2013), el análisis de plagas en los cultivos (C. Ramírez, 2006), la ecología de poblaciones animales (Fortin, James, MacKenzie, Melles, & Rayfield, 2012) o las ciencias forestales (Menéndez, 2012; Miranda-Salas & Condal, 2003), por citar solo algunos ejemplos, hacen uso de la geoestadística.

La extensión Geostatistical Analyst de ArcGIS brinda dos grupos de técnicas de interpolación que se basan principalmente en el análisis de muestras cercanas para crear la superficie a predecir: técnicas determinísticas y geoestadísticas. Mientras las herramientas determinísticas (IDW, Spline, polinomios locales y globales), utilizan funciones matemáticas para crear la superficie de interpolación, las herramientas geoestadísticas (Kriging/Cokriging) utilizan funciones probabilísticas para crear mapas de interpolación y mapas de margen de error que evalúan dichas estimaciones (Johnston et al., 2003). Todo análisis geoestadístico comprende una serie de etapas, preferiblemente iterativas, para lograr el resultado final, que para el presente caso, fue un mapa de predicción para definir áreas diferenciadas (densidad de tallos) para el aprovechamiento de guadua.

2.4.1 Términos empleados en geoestadística

Para abordar el análisis geoestadístico, se definen algunos términos de uso común en este tipo de análisis y, posteriormente, se describe la clasificación de las técnicas de interpolación determinística. Las definiciones fueron tomadas de Johnston y colaboradores (Johnston et al., 2003), a saber:

- Anisotropía: propiedad de los procesos espaciales o de los datos donde la dependencia espacial (autocorrelación) cambia tanto en función de la distancia como de la dirección entre dos puntos.
- Autocorrelación: correlación estadística entre dos variables espaciales aleatorias del mismo tipo, atributo, nombre, etc., donde la correlación depende de la distancia y/o la dirección que las separa.
- Bin: parejas de puntos agrupadas por distancias y direcciones similares.
- Cokriging: es un método de interpolación estadístico que usa múltiples tipos de datos (múltiples atributos) para predecir (interpolarse) valores. Es flexible y permite investigar la autocorrelación espacial y la correlación cruzada en los datos. Cokriging emplea modelos estadísticos y genera mapas predictivos de los datos, mapas predictivos de error, y mapas de cuantiles, entre otros. La flexibilidad del cokriging exige que se tomen varias decisiones (o que se empleen los parámetros por defecto). Cokriging asume que los datos provienen de procesos estacionarios estocásticos, y algunos métodos requieren que los datos provengan de distribución normal.
- Determinístico: es un tipo de un modelo donde los resultados son completa y exactamente conocidos basados en los valores de entrada: los valores no aleatorios del modelo. En el análisis geoestadístico, los métodos de interpolación que no tienen componentes aleatorios (IDW, polinomio global, polinomio local y funciones de base radial) son determinísticos. Los métodos estadísticos (kriging, cokriging) pueden tener componentes determinísticos, generalmente denominado tendencia.
- Detrending (eliminación de tendencia): proceso en el que se retira la tendencia de la superficie de los valores originales con el empleo de funciones polinómicas. Los valores resultantes, sin dicha tendencia, son llamados residuales.

- Disimilaridad: cuando los valores que se parecen menos. El semivariograma es una función de disimilaridad porque aumenta con la distancia, indicando que los valores son menos parecidos a medida que se distancian. Por ello, entre mayor es el valor del semivariograma, mayor es la disimilaridad.
- Error estándar de predicción: es el valor calculado de la raíz cuadrada de la varianza de predicción, o la variación asociada a la diferencia entre el valor verdadero y el valor estimado. El error estándar de predicción cuantifica la incertidumbre de predicción. Una regla básica es que el 95% de las veces, el valor verdadero estará dentro del intervalo formado por el valor estimado ± 2 veces el error estándar de predicción, si los datos presentan distribución normal.
- Estacionaridad intrínseca: asunción de que los datos provienen de un proceso aleatorio con una media constante y un semivariograma que depende de la distancia y la dirección que separa dos lugares cualesquiera.
- Funciones en base radial: son interpoladores moderadamente rápidos, determinísticos y exactos. Son más flexibles que IDW, pero tienen más parámetros que ajustar. No evalúan error de predicción. El método brinda superficies estimadas que se comparan con kriging. Las funciones en base radial no permiten investigar la autocorrelación espacial de los datos, haciéndolo menos flexible y más automático que el kriging. Las funciones radiales no hacen asunciones sobre los datos.
- Histograma de frecuencias: refleja las principales características de la distribución de los datos en términos de frecuencias relativas y brinda un resumen de las estadísticas para verificar la distribución normal de los datos.
- Interpolación: predicción de valores en lugares donde no hay datos observados, empleando datos de lugares con valores conocidos. Usualmente, la interpolación es para predecir información dentro del área donde los datos han sido colectados, en lugar de extender las predicciones a lugares por fuera del área de recolección.

- Interpolación de polinomio global: es un interpolador rápido, determinístico, suavizado e inexacto. No requiere muchas decisiones en los parámetros para ajustar el modelo. Se emplea mejor en superficies que cambian lenta y gradualmente. No presenta elementos para evaluar el error de predicción. Los datos de los puntos extremos (márgenes) pueden afectar significativamente la superficie.
- Interpolación de polinomio local: uno de los métodos determinísticos empleados en el análisis geoestadístico. La superficie interpolada no está forzada a pasar a través de los datos (método inexacto).
- Interpolación del inverso de la distancia ponderado (IDW): es un interpolador determinístico rápido y exacto (los valores muestreados son incluidos en la superficie resultante). Se toman pocas decisiones en el ajuste de parámetros para el modelo. Es una buena manera de dar una primera mirada a una superficie a interpolar. Sin embargo, no tiene cómo evaluar los errores de predicción y puede producir “ojos de buey” alrededor de los puntos muestreados. No requiere asunciones.
- Interpolación tipo Spline: un método de interpolación determinística empleado en el análisis geoestadístico; es un caso especial de interpolación en función de base radial. La superficie interpolada está forzada a pasar a través de todos los datos y no dispone de error estándar.
- Isotropía: propiedad de los procesos naturales o de los datos con dependencia espacial (autocorrelación) en donde ocurren cambios solo por la distancia que hay entre dos ubicaciones (la dirección no es importante).
- Kriging: es un interpolador relativamente rápido que puede ser exacto si los datos no tienen error de medición, o suavizado si los datos tienen error de medición (eliminación de valores atípicos). Es flexible y permite investigar la autocorrelación espacial de los datos. Ya que kriging emplea modelos estadísticos, permite una variedad de mapas de salida que incluyen predicción

de superficie, predicción de error estándar, probabilidad y mapa de cuantiles. La flexibilidad del kriging exige que se tomen varias decisiones (o que se empleen los parámetros por defecto). Kriging asume que los datos provienen de procesos estacionarios estocásticos, y algunos métodos requieren que los datos provengan de distribución normal.

- Lag: vector que separa dos puntos (ubicaciones); tiene distancia y orientación. Ver Gráfico 2.
- Nugget (efecto pepita): parámetro empleado en el modelo de covarianza o semivariograma que representa un error independiente, un error de medición y/o un error de variación a nivel de microescala, demasiado fino para ser detectado. El efecto pepita o efecto nugget, se expresa como una discontinuidad en el origen del modelo de covarianza o del semivariograma. Ver Gráfico 2.
- Rango: parámetro del modelo de covarianza o del semivariograma que representa la distancia, más allá de la cual, hay muy poca o ninguna autocorrelación espacial entre las variables estudiadas. Ver Gráfico 2.
- Semivariograma: gráfica que permite examinar la autocorrelación espacial entre los valores muestreados, para ello, grafica en un plano las diferencias de los valores (semivarianza) en el eje-y, contra la distancia que los separa, en el eje-x. Cada punto del semivariograma es la diferencia, de los valores elevados al cuadrado, de cada pareja de puntos. Partiendo del supuesto que los lugares cercanos presentan valores similares, el valor del eje-y es menor entre más cercanos sean los puntos comparados, y a medida que la distancia entre los puntos comparados aumenta, el valor del eje-y aumenta hasta alcanzar una meseta (sill), donde deja de haber correlación entre los valores comparados y, por lo tanto, hay mayor disimilaridad. El semivariograma se describe con los parámetros efecto nugget (efecto pepita), umbral (sill) y rango. Ver Gráfico 2.



Gráfico 2. Partes de un semivariograma. Eje x, señala la distancia o lag entre parejas de puntos. Eje y, señala el valor de la semivarianza entre bins (parejas de puntos). Cada punto rojo señala la semivarianza entre cada pareja de puntos comparados. La línea amarilla es el ajuste empírico del modelo. Range: rango; sill: umbral; nugget: efecto pepita; Lag distance: distancia de comparación entre parejas de puntos. Fuente: (Johnston et al., 2003).

- **Tendencia**: una superficie compuesta por parámetros fijos, por lo general polinómicos de coordenadas x e y; es la parte no aleatoria de un modelo espacial que describe un atributo. La tendencia usualmente modela la variación principal (escala mayor) y deja los errores aleatorios para modelarlos a escala más finas.

2.4.2 Técnicas determinísticas de interpolación

Las técnicas determinísticas se pueden dividir en: técnicas globales (polinomio global) y técnicas locales (IDW, polinomios locales). Las técnicas globales emplean todos los datos para predecir áreas no muestreadas, mientras las locales, realizan sus predicciones a partir de sus vecinos más próximos (Gráfico 3).

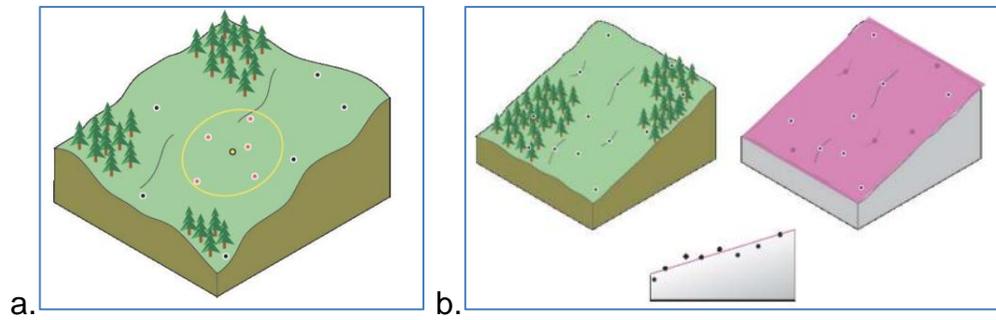


Gráfico 3. Modelos determinísticos de interpolación: (a) locales; (b) globales. Fuente (Johnston et al., 2003).

Un tercer método toma en cuenta tanto las características globales, como las variaciones locales, para ajustar de forma más precisa las pequeñas variaciones de los datos en cuestión, considerando la generalidad del espacio. Este método se llama función de base radial.

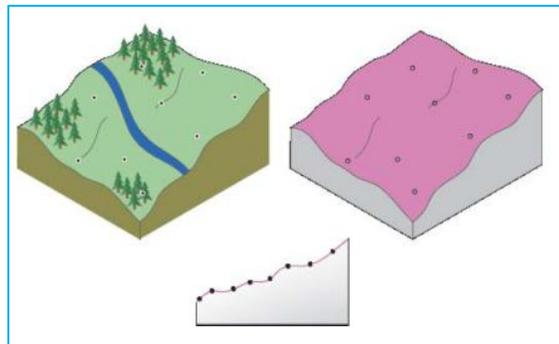


Gráfico 4. Función de base radial. Fuente (Johnston et al., 2003).

3 Metodología

3.1 Área de estudio

3.1.1 Localización

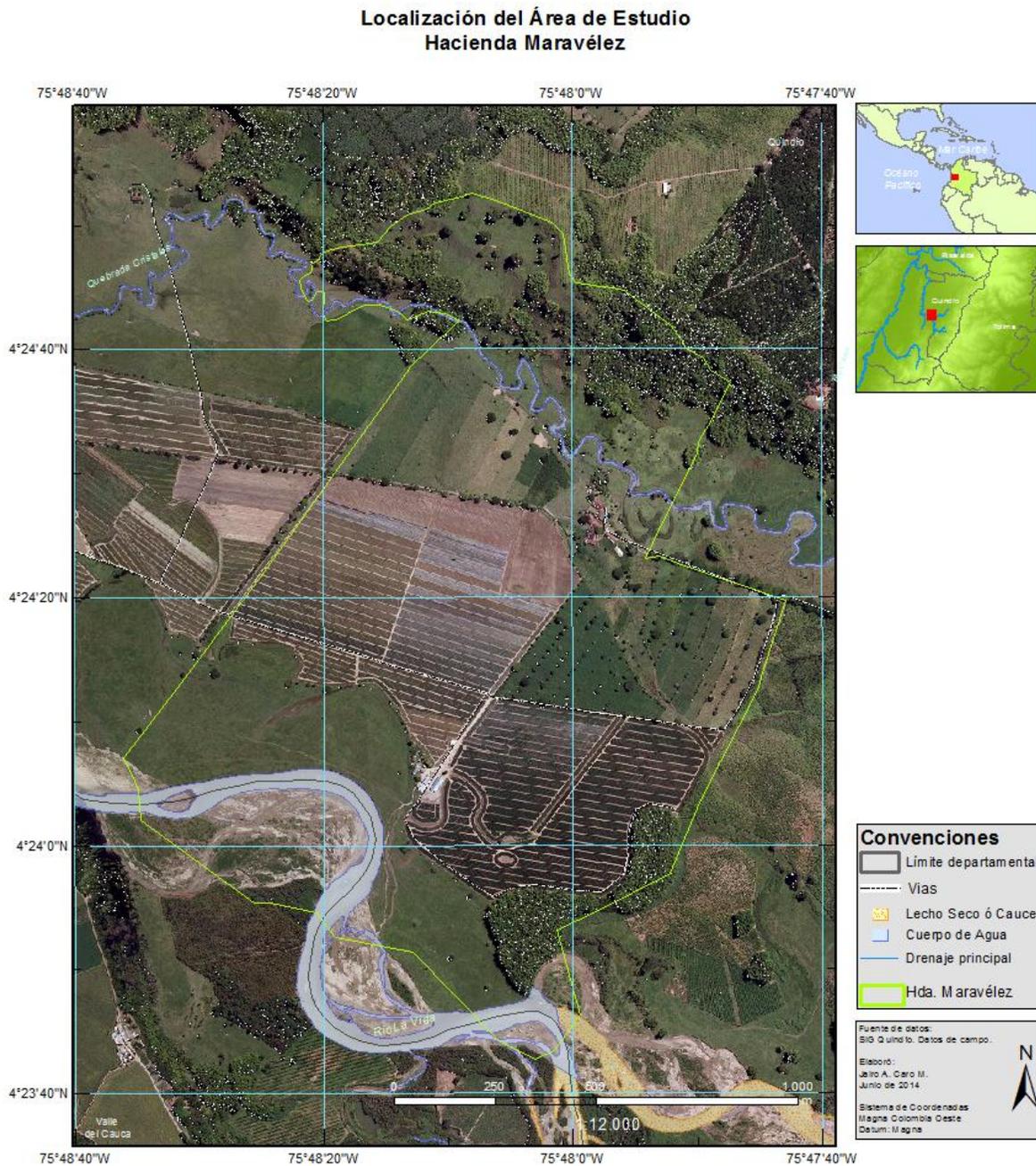
El área de estudio está localizada en el sector rural del municipio de La Tebaida, en la vereda de Maravelez al sur de este municipio del departamento del Quindío (Colombia), sobre la rivera derecha de la confluencia de los ríos Quindío y Barragán en la formación del río La Vieja (Mapa 1). El predio donde se realizó el estudio es la hacienda Maravélez. La altura promedio sobre el nivel del mar es de 1000 m.

Limita al Norte con los predios Guaruya y Paraná, al Sur con el río La Vieja, al Este con el predio de Roberto Marulanda , y al Oeste con la hacienda El Golfo (Lozano, 2014).

3.1.2 Usos y cobertura de la tierra

El uso principal del suelo es el cultivo de piña (*Ananas comosus*) y pasturas para ganado. El predio tiene un área aproximada de 191 ha + 8538 m², distribuidas así:

USOS	Área (ha)
Bosques en guadua	13,22
Vías internas e infraestructuras	5
Potrerros y otros	173,63
TOTAL	191,85



Mapa 1. Localización área de estudio

3.1.3 Clima

La zona presenta una temperatura promedio de 24,7°C y la precipitación media anual es 2002 mm, con una distribución bimodal de dos períodos lluviosos de marzo a mayo y de septiembre a noviembre (World Bank, 2014).

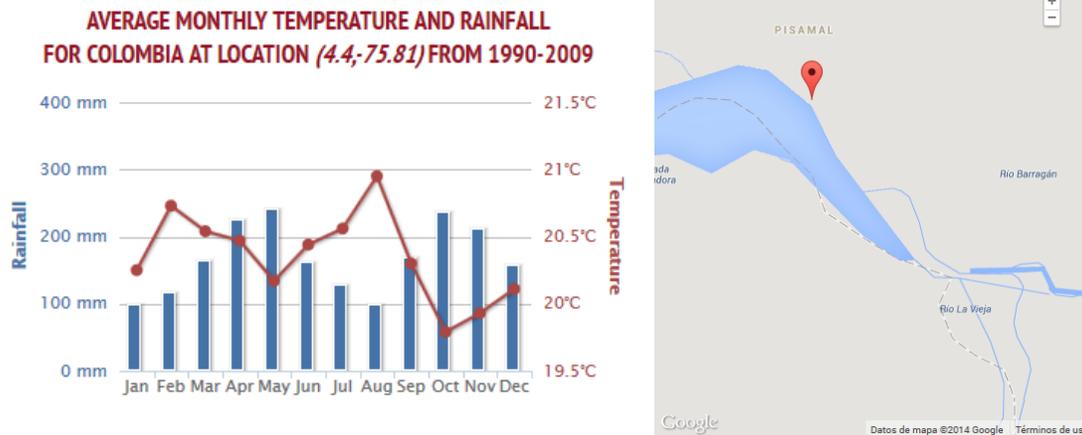


Gráfico 5. Datos de precipitación y temperatura media anual en el periodo 1900-2009 (coordenadas N4° 24' 36"; W -75° 49' 47" sobre margen derecha del río La Vieja). Fuente (World Bank, 2014)

3.1.4 Geología y Geomorfología.

El Valle de Maravélez y Pisamal, como también se conoce a este sector, está geológicamente conformado por rocas sedimentarias y metamórficas del Paleozoico, Mesozoico y Terciario y está cubierto por espesos depósitos cuaternarios de origen fluviovolcánico, fluvioglacial, fluvicoluvial, predominando las coberturas de material piroclástico y de cenizas (Orejuela, Echeverri, & Caro, 2002). En el 2002, se realizó un estudio de factibilidad para la construcción de un bioparque en este valle, de donde se obtuvo la información de la geología y suelos (IGAC, 1996 en Orejuela et al., 2002):

“Clasificación geológica TQ - Corresponde a depósitos no consolidados de ceniza y flujo de lodo volcánico, de un espesor superior a 100 m originado por la actividad volcánica explosiva sobre el eje de la Cordillera Central en los volcanes nevados del Quindío, Santa Isabel y Santa Rosa y la posterior descongelación de casquetes glaciares durante el Plioceno y el Pleistoceno, formaron flujos de lodo que descendieron por el valle del río Quindío” (Orejuela et al., 2002, p. 8).

“Clasificación geológica Qar - Corresponde a depósitos aluviales recientes y actuales, asociados a los valles de los ríos Quindío, Barragán y La Vieja, se encuentran depósitos aluviales formando terrazas y vegas, producto del transporte y acumulación

de materiales provenientes de las partes altas de la cordillera. Los materiales están conformados por bloques, cantos, gravas, arenas y limos embebidos en una matriz areno arcillosa” (Orejuela et al., 2002, p. 8).

Su geomorfología comprende dos grandes paisajes (ver Foto 3):

“Paisaje de Piedemonte: Comprende el final del abanico torrencial del Quindío. Clasificación geomorfológica p4, talud de abanico torrencial de clima medio, húmedo transicional a medio seco. Relieve ondulado a fuertemente quebrado. Erosión moderada a severa.

Paisaje de Valle: Comprende la formación de terrazas, de clima medio húmedo, relieve ligeramente plano, aluviones recientes finos y gruesos, cenizas volcánicas, erosión ligera. Vegas de clima medio, húmedo, relieve plano Aluviones recientes gruesos, medianos a finos”. (Orejuela et al., 2002, p. 8).

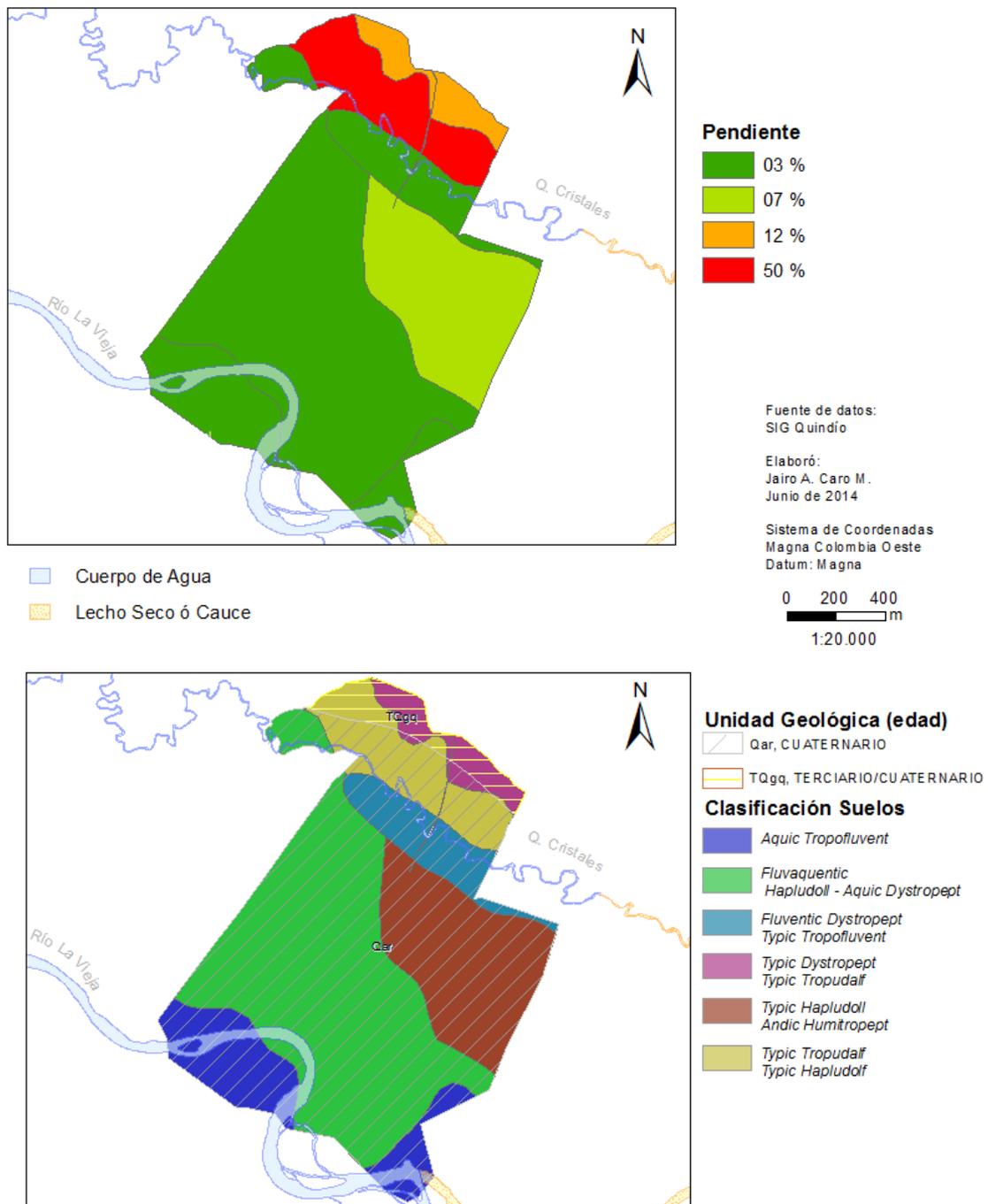


Foto 3. Panorámica de la geomorfología del área de estudio. En primer plano, cultivos de piña. En el fondo, guaduales en pie de monte. Foto: Jairo Caro ©2014

3.1.5 Suelos

Los suelos se han desarrollado a partir de sedimentos aluviales de textura arenolimoso moderadamente gruesa. El predio presenta un relieve de valle y piedemonte, con pendientes que van del 1% al 5% en la zona plana y del 10% al 50%, en la zona de colinas ([Lozano, 2014](#)) (Ver Mapa 2).

Caracterización de suelos y geomorfología Hacienda Maravález



Mapa 2. Suelos y geomorfología de la zona de estudio. Fuente: SIG Quindío.

“Suelos de vallecitos: son suelos del abanico torrencial, pertenecen a la Asociación Quindío Guarinó, definidos como Fluventic Dystropepts y Typic Tropofluvents que se localizan dentro de los vallecitos angostos de clima medio, húmedo, clasificados dentro del Orden Entisol. Suelos poco evolucionados que se han desarrollado a partir de sedimentos aluviales, el perfil tiene morfología A-B-C. El horizonte A tiene color pardo amarillento oscuro y textura gruesa; el horizonte B es de color pardo amarillento y pardo grisáceo oscuro. El horizonte C es de color pardo oscuro a pardo con manchas rojo amarillentas, textura gruesa; son bien drenados con pH variable entre 5,3 y 5,6, moderadamente ácidos. Moderadamente profundo limitados por el nivel freático” (Orejuela et al., 2002, p. 9).

“Suelos de Vegas: son suelos de la Asociación Ceilán – Danubio, definidos como Fluvaquentic Hapludolls (50%) – Aquic Dystropets (50%), localizados cerca de la confluencia de los ríos Quindío y Barragán, dentro del clima medio húmedo y alturas de 1.000 a 1.100 metros SNM. El relieve es plano con pendientes menores del 3%, con problemas de encharcamientos debido a desbordamientos de los ríos que los circundan. Son suelos poco evolucionados y se formaron a partir de aluviones. Están ocupando áreas ligeramente cóncavas y mal drenadas (...) El perfil es poco desarrollado con morfología A-B-C (Ap-Bw1-Bw2-Ab-C) en la cual el horizonte A es de color pardo grisáceo muy oscuro y textura moderadamente fina al tacto, que descansa sobre un horizonte B espeso, de color pardo amarillento oscuro con manchas de color gris y texturas medias a finas; aparece un horizonte A sepultado de color gris oscuro y textura media que yace sobre un horizonte C de color gris verdoso y textura fina al tacto. Son suelos superficiales, limitados por el nivel freático, pobremente drenados, de fertilidad moderada, pH 6,0 a 6,5 ácidos a neutros, medianos contenidos de materia orgánica, altos en calcio y magnesio y bajos en fósforo y potasio” (Orejuela et al., 2002, p. 9).

“Suelos de Terrazas: Son suelos de la Asociación Barragán-Picota definidos como Typic Hapludolls (50%)-Andic Humitropepts (30%) con inclusiones de Typic Tropofluvents, que se localizan en pequeñas terrazas formadas por el río Quindío, en altitudes de 1.100 a 1,200, dentro del clima medio húmedo. El relieve es ligeramente ondulado, con pendientes menores del 7% y erosión ligera. Son poco o medianamente evolucionados, se han desarrollado a partir de sedimentos aluviales e inclusiones de cenizas volcánicas; se sitúan en las áreas más bajas y partes planas del sector; el perfil presenta una secuencia de horizontes ABC (Ap-Bw-C) de texturas moderadamente finas a finas y colores pardo oscuro, pardo grisáceo muy oscuros y

grises, con abundantes manchas rojo amarillentas, producto de un drenaje moderado e imperfecto. Poco profundos limitados por arcillas compactadas, de fertilidad moderada, pH 5,3 a 6,2 reacción ácida, mediano contenido de materia orgánica, calcio y magnesio y bajos contenidos de fósforo y potasio” (Orejuela et al., 2002, p. 9)

3.1.6 Hidrografía

El área está cruzada por la quebrada Cristales que fluyen en dirección de oriente-occidente. El predio está rodeado por el río Quindío que cursa por el costado oriental de la Hacienda, en dirección oriente a occidente, luego confluye con el río Barragán para formar el río La Vieja que sigue la misma dirección (ver Mapa 1).

Aguas subterráneas y Nivel freático: la geomorfología de vallecitos, terrazas y vegas facilita el encharcamiento, dada la proximidad de la quebrada Cristales y La Vieja. El área tiene abundancia de aguas subterráneas y un nivel freático alto, en algunos casos a menos de 1 metro (Orejuela et al., 2002).

3.1.7 Formaciones Vegetales

El predio se encuentra situado en la zona de vida Bosque muy húmedo Premontano Bmh-PM (*sensu* Holdridge). La vegetación que se encuentra es arbórea, arbustiva y herbácea; aunque la mayor parte de los bosques naturales fueron talados para establecer cultivos agrícolas y de pastoreo, quedan relictos de guaduales y bosques de galería, presentando estratificación vertical de sucesiones: a) *Bosque bajo:* sotobosque compuesto por vegetación desde rastrera hasta 2 metros de altura. b) *Estrato arbustivo:* Caña brava, higuierillos, chilca y pasto King grass y, c) *Dosel:* el sector norte presenta fragmentos de bosque primario, en su mayoría con especies arbóreas y herbáceas maduras, hay abundantes matas de guadua.

3.1.8 Flora y Fauna

Estudios realizados en la zona reportan un total de 162 especies de plantas (66 spp de árboles, 72 de arbustos y 24 de hierbas) (CRQ, 1997), entre ellas, Mestizo

(*Cupania cinerea*), Yarumo (*Cecropia sp*), Juan blanco (*Tetrorchidium rubrinervium*), Ficus (*Ficus sp*), Písamo (*Erithrina fusca*), Chamburo (*Erythrina glauca*), *Ficus benjamina*. Al interior del guadual se encuentran hierbas y epifitas en todos los estratos, sobresaliendo el *Abalazos monstera*, pertusaortigo (*Urera baccifera*), helecho chiroso (*Nephrolepis hexagonal*), rascadera (*Xantohosoma violaceun*), araliáceas, musáceas, entre muchas otras.

De las 543 aves reportadas para el departamento ([Arbeláez-Cortés et al., 2011](#)), se han registrado más de 124 especies en el sector ([CRQ, 2001](#)) como la caravana pellar (*Vanellus chilensis*), chamón (*Molothrus bonariensis*), gallinazo (*Coragyps atratus*), garza bueyera (*Bulbulcos ibis*), gavián garrapatero (*Milvago chimachina*), pechirrojo (*Pyrocephalus rubinus*), perdiz (*Colinas cristatus*), silga (*Sporophila intermedia*).

En cuanto a mamíferos, se reportan 53 especies ([CRQ, 2001](#)) entre ellas, ardillas (*Sciurus granatensis*), chuchas (*Didelphys albiventris*), comadrejas (*Mustela frenata*), gurrees o armadillos (*Dasipus novemonetus*) y mono aullador (*Alouatta seniculus*), además de la presencia de insectos de diferentes órdenes y familias ([Orejuela et al., 2002](#)).

3.2 Pasos de metodología

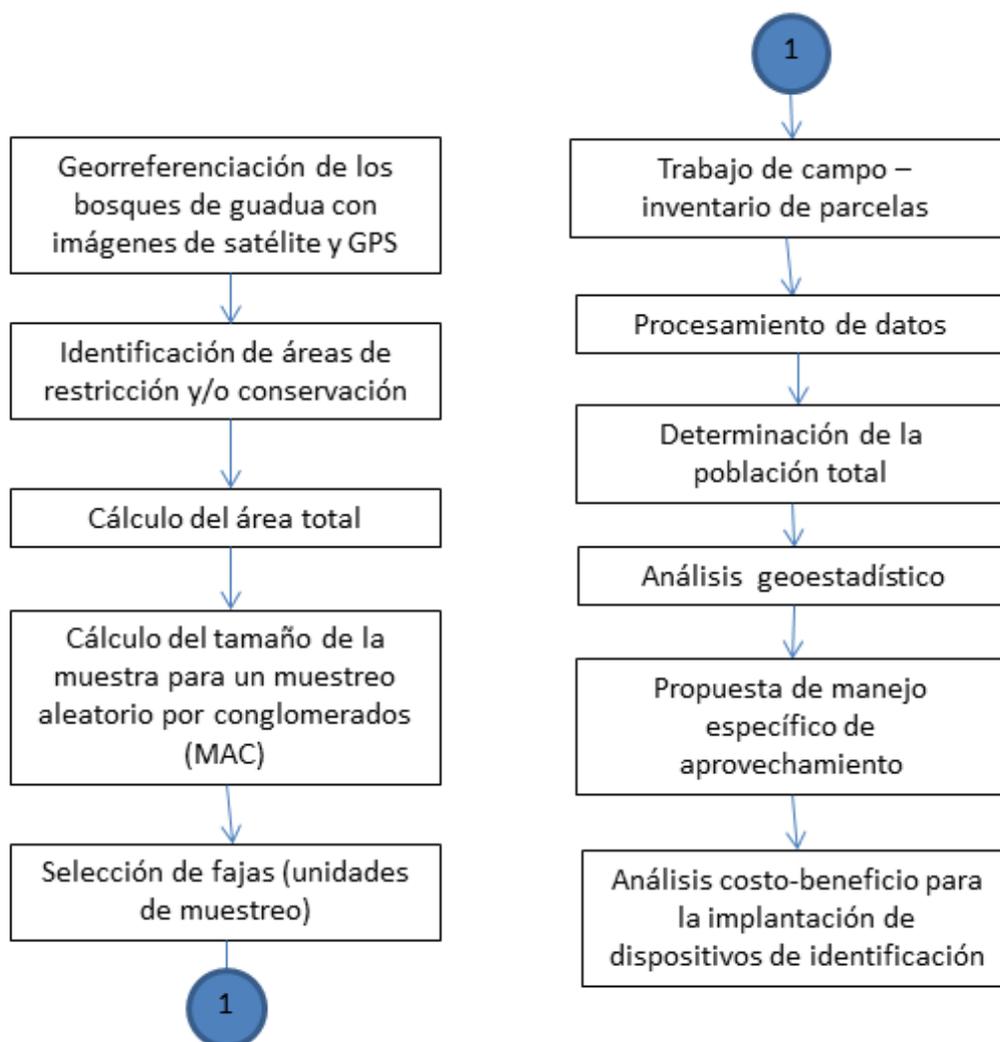


Gráfico 6. Flujograma de trabajo.

3.2.1 Georreferenciación de los bosques de guadua

Se realizó la georreferenciación de las matas de guadua, con el software ArcGIS 10.1, empleando como capa base el ortofotomosaico del departamento cuya adquisición es de 2010 (CRQ, Gobernación del Quindío, & IGAC, 2012), facilitada por la oficina de planeación de la gobernación del Quindío mediante el servicio WMS (Web Map Service). La imagen está disponible en formato png y jpg, tiene una resolución de 1:2000 a 96 dpi y no permite análisis espectral. El servicio

WMS ofrece adicionalmente capas de catastro, topografía, vías, hidrografía, entre otras.

El procedimiento de georreferenciación de guaduales con el uso de imágenes de satélite, evaluado por Kleinn y Morales (Kleinn & Morales-Hidalgo, 2006), sugiere la reducción de 8,6 m hacia el interior de la imagen para eliminar la proyección de ramas y hojas (ver Gráfico 7): este protocolo fue tomado como referencia para el proceso de geolocalización y cálculo inicial del área de los rodales.

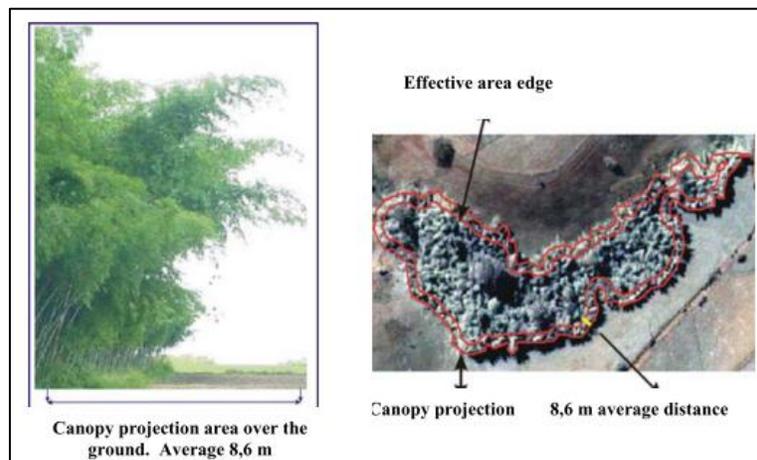


Gráfico 7. Cálculo del área de guaduales reduciendo la proyección de ramas y hojas. Fuente (Kleinn & Morales-Hidalgo, 2006).

Los polígonos corregidos de cada mata de guadua fueron cargados a un GPS Garmin 62CSX mediante el software DNRGPS (Minnesota Department of Natural Resources, 2014) y se tomaron puntos de control en tierra con un margen de error de 2 a 5 m. Con esta información recolectada en campo, se verificó nuevamente cada uno de los polígonos y se elaboró el mapa de geolocalización de guaduales (Mapa 3).

Durante el recorrido de campo se identificaron los rodales para fines productivos y los guaduales de conservación. Los guaduales en terrenos con pendientes mayores a 45° no fueron tomados como áreas productivas (Foto 4), puesto que actividades extractivas en este tipo de terrenos afecta la cobertura vegetal y

genera procesos de erosión. Así mismo, los lotes con elevada diversidad de especies fueron excluidos de las áreas productivas, bajo el principio precautorio de conservación.



Foto 4. Guadales en áreas de producción con pendiente nula o moderada (izq). Guadales en pendientes superiores a 45° excluidos de áreas productivas (der.). Jairo Caro© 2014.



Foto 5. Presencia de monos aulladores (*Alouatta seniculus*) en algunos guadales. Foto: Guillermo Lozano © 2014.

3.2.2 Muestreo aleatorio por conglomerados

Los muestreos pueden clasificarse entre probabilísticos y no probabilísticos. Para el caso de inventarios de guadua, el muestreo es de tipo probabilístico, ya que todas las unidades de muestreo de la población tienen la misma probabilidad de ser elegidas. Una unidad de muestreo elegida permite realizar inferencias para toda la población, y se conoce el nivel de certeza y representatividad que brinda

dicha muestra. Según la norma unificada, los tipos de muestreo probabilístico aplicables para el estudio de guaduales son: muestreo aleatorio simple (MAS), muestreo aleatorio estratificado (MAE) y muestreo aleatorio por conglomerados (MAC). En el presente trabajo se optó por el MAC porque presenta un área mayor a 3 ha y es, entre los tres métodos mencionados, el que permite realizar los estudios a un menor costo relativo sin afectar la eficiencia de los resultados (Camargo, Morales, & García, 2007).

Este método permite que se definan fajas, que pueden ser de diferente longitud (y por lo tanto diferente número de parcelas por faja), conservando siempre el mismo ancho (10 m) (Camargo et al., 2008; Camargo, Morales, et al., 2007). Para el presente análisis, se utilizaron los datos del estudio presentado a la CRQ para el aprovechamiento comercial de la hacienda Maravélez, realizado el ingeniero forestal Guillermo Lozano (Lozano, 2014). En dicho estudio, las fajas se orientaron en sentido oriente-occidente.

- **Sesgo de selección**

El sesgo de selección se presenta cuando una parte de la población no hace parte de la población muestreada (Camargo et al., 2008; Camargo, Morales, et al., 2007); para el presente trabajo, los datos para dos fajas, de las seis fajas presentadas en el estudio de Lozano (2014), fueron excluidas del presente estudio. Lo anterior obedeció a motivos particulares de acceso a la información.

- **Cálculo de la intensidad de muestreo**

La intensidad de muestreo está representada por el área ocupada por las parcelas (o su porcentaje del área total) y varía de acuerdo al tamaño del área a inventariar. Para calcular la intensidad de muestreo se requiere la varianza de un dato población, para ello, se realizó un premuestreo para estimar de la densidad de culmos por unidad de área y su varianza (Lozano, 2014). Para propósitos del aprovechamiento comercial, se definió como unidad de muestreo la faja y como subunidad de muestreo la parcela. La parcela es cuadrada de 100 m² (10 x 10 m).

Se empleó la ecuación (1) para el cálculo del tamaño de la muestra (n) o número de unidades primarias, partiendo del supuesto de que los conglomerados son de igual tamaño.

$$n = Z_{\alpha/2}^2 \frac{v}{e^2} \quad (1)$$

Donde

n = número de unidades primarias

v = desviación estándar de la densidad de culmos

e = error de muestreo deseado (densidad de culmos)

$Z_{\alpha/2}^2 v/e^2$: es el número de desviaciones estándar en la distribución Normal que deja una región deseada (nivel de confiabilidad) a cada lado de la media, que son al 90% de confiabilidad 1.65, al 95% 1.96, y al 99% 2.58.

Se asumió un nivel de confiabilidad de 95% y un error de muestreo menor o igual al 10%.

- **Selección de unidades y subunidades de muestreo**

Cuatro fajas del estudio de Lozano (2014) fueron georreferenciadas en campo. Empleando la ecuación (1) se calculó la intensidad de muestreo (n) acorde al marco de muestreo (N). Se propone como método de selección de fajas, utilizar la aplicación *Sampling Design Tool for ArcGIS* (Buja & Menza, 2013). La herramienta permite identificar las fajas a muestrear y aleatorizar, al interior de las fajas, las parcelas o subunidades de muestreo hasta completar el 5% del área de la población objetivo (Mapa 4) como lo define la *norma unificada*. La ventaja de la aplicación de la herramienta *Sampling Design Tool for ArcGIS* es que permite escoger capas para correr un muestreo aleatorio simple, en lugar de simplemente puntos como lo dispone la herramienta *create random points*. Para ello, fue necesario graficar primero el marco de muestreo con la herramienta *create fishnet*, la cual permite crear tanto polígonos como polilíneas (fajas o parcelas), de acuerdo a la necesidad.

3.2.3 Trabajo de campo y procesamiento de datos

Conocidas las fajas y parcelas a inventariar, se exportan las capas al navegador GPS empleando el software DNR GPS (Minnesota Department of Natural

Resources, 2014) para replantarlas en el guadual. En cada parcela, se marcaron todos los individuos y se diferenci3 su grado de madurez: renuevo, verde, madura, sobremadura y seca.

Adicionalmente, se midi3 el CAP (circunferencia a la altura del pecho) en la mitad del entrenudo que se ubica a la altura del pecho (ver Foto 6); se realiz3 esta medici3n 3nicamente para los culmos comerciales (guaduas maduras y sobremaduras). Con este dato se calcul3 el diámetro a la altura del pecho (DAP), como lo sugiere la metodolog3a (Camargo, Dossman, Rodríguez, & Arias, 2011).

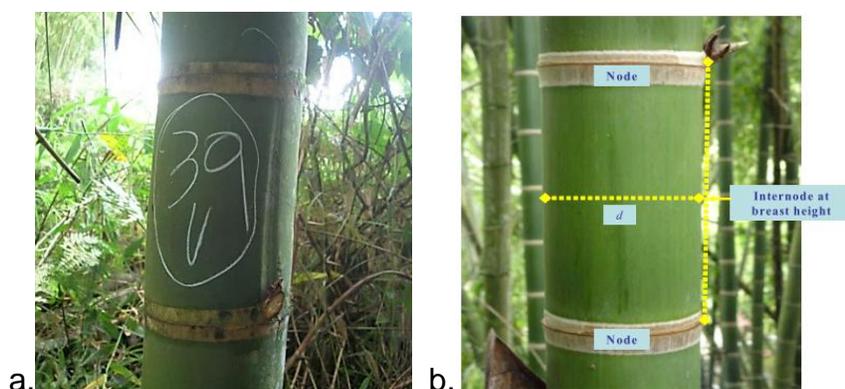


Foto 6. a) Marca del número consecutivo del individuo en la parcela y su estado de madurez (v: verde). Foto: Jairo Caro© 2014. b) Diámetro del internodo a la altura del pecho (DAP). Foto: Juan Carlos Camargo (Camargo, Dossman, et al., 2011)

El procesamiento de los datos consider3 los siguientes pasos (Camargo, Morales, et al., 2007):

1. Se calcul3 el área para cada faja (i), el número de parcelas por faja muestreada (m_i) y el total de parcelas por faja (M_i). De cada parcela (j) se obtuvo el total del culmos (y_{ij}) para estimar el total de culmos por cada faja (\hat{t}_i), de acuerdo a la ecuaci3n (2). (Ver datos en Tabla 5).

$$\hat{t}_i = \sum_{j \in S_i} \frac{M_i}{m_i} y_{ij} = M_i \bar{y}_i \quad (2)$$

2. Posteriormente se calcul3 el total de culmos en el rodal.

$$\hat{t} = \frac{N}{n} \sum_{i \in S} \hat{t}_i \quad (3)$$

3. El siguiente paso fue calcular la varianza y el error de la estimación. Para este punto se emplearon las ecuaciones descritas por Camargo y colaboradores (2007) para MAC y los resultados se resumieron en la tabla de variables calculadas (Tabla 6).

3.2.4 Determinación de la población

Se expresan los valores calculados del total de tallos del área de muestreo, su límite superior e inferior y se precisa el margen de error del muestreo.

3.2.5 Análisis geoestadístico

3.2.5.1 Exploración de los datos

Se realizó la exploración estadística de los datos y se realizó un análisis de semivarianza (semivariograma) para observar si existía o no autocorrelación espacial.

Se analizaron los valores de DAP (diámetro máximos, mínimos y promedios), el estado de madurez, y la densidad de tallos comerciales: maduras y sobremaduras, a través de gráfico de máximos y mínimos, histograma de frecuencias y semivariogramas.

Para el análisis de semivariograma, cada variable se analiza por parejas de datos (bins), se define la distancia entre los puntos (lag size) y el número total de parejas que se van a comparar (number of lags). Una selección adecuada de la distancia de análisis (lag size) permite revelar patrones de correlación espacial. Adicionalmente, se puede incorporar o excluir alguna tendencia que esté afectando el conjunto de datos, como el viento en un análisis de contaminación, o el efecto de borde en un análisis de diversidad de especies. En el presente análisis se excluyó cualquier tendencia (detrending) y solamente se consideró la anisotropía, esto es, mayor probabilidad de que los datos presenten correlación espacial si se analizan bajo una orientación y una distancia específica.

3.2.5.2 Gráfico de interpolación

Los pasos para ajustar el gráfico de interpolación, ya sea determinístico o estadístico (kriging/cokriging), comienzan por la exploración de los datos, para luego, realizar el mapa de predicción. Los pasos para obtener un mapa de kriging/cokriging incluyen, específicamente, ajustar el modelo geoestadístico mediante la transformación de los datos (que no tengan y requieran ajustarse) a una distribución normal; desagrupamiento (declustering) de datos cuando el muestreo se realiza en zonas, o muy por debajo, o muy por encima de la media poblacional; y, ajustar el semivariograma para confirmar la autocorrelación espacial (Johnston et al., 2003).

La selección del método de interpolación depende de la naturaleza de los datos, del conocimiento del terreno y, finalmente, de probar cuál de ellos se ajusta mejor a los datos. Cada método exige la selección de determinados parámetros (unos métodos exigen más parámetros que otros) para poder reducir el error estándar de predicción (Root Mean Square Prediction Error - RMSPE) en la estimación de los datos interpolados. RMSPE es un valor de resumen estadístico que calcula la herramienta de validación cruzada a través del asistente de Geostatistical Analyst de ArcGIS, en el que, cada valor medido en campo, es removido y comparado con el valor interpolado -para esa ubicación-, hasta alcanzar el mínimo margen de error (Johnston et al., 2003).

En el presente estudio se empleó la interpolación determinística radial (tipo spline), debido a que los datos recolectados (densidad de tallos por parcela, DAP y altura) son descriptivos y, en el análisis de semivarianza, no reflejaron autocorrelación espacial (ver resultados). Esta información condujo a descartar el empleo de las técnicas de kriging/cokriging. Complementariamente, Ramírez y colaboradores (J. Ramírez et al., 2005) demuestran que, entre las técnicas de interpolación determinística, las funciones de base radial son las que mejores resultados arrojan en estudios forestales. Al interior de la herramienta Spline, se compararon los métodos “completely regularized Spline” e “inverse multiquadric”, ajustando algunos parámetros. Para una revisión de los parámetros de selección empleados

en el método Spline, se presenta en el anexo 1 un análisis comparativo para la selección del (sub)método más ajustado para el conjunto de datos.

3.2.6 Análisis de costo-beneficio

En el capítulo “Tecnologías empleadas para la marcación” (p 44), se describieron los métodos principales de identificación de la madera: balance de masas y marcación individualizada. Tanto la marcación por lotes (o balance de masas), como la marcación individualizada, permiten el empleo de identificadores externos y firmas internas (químicas o genéticas). Sin embargo, partiendo del hecho que no existe una cultura de marcación en el sector de la guadua, el presente análisis compara los métodos de marcación aplicados a lotes. Una adecuada implementación de cualquiera de estas tecnologías a nivel de lote brindará la experiencia para abordar una escala de mayor de información, como lo es la marcación individualizada.

Para escoger el tipo de identificador más idóneo es necesario tener en cuenta las etapas y procesos en los cuales este dispositivo ha de ser empleado. Las principales etapas de la cadena de custodia de guadua, en el eslabón de producción primaria, son: a) tallos en pie; b) número de tallos comerciales cosechados; c) número de piezas obtenidas en campo a partir de tallos cosechados; y d) transporte hasta destino final o intermedio (en el caso de procesos de transformación).

Con base en lo anterior, se realizó una matriz de doble entrada para escoger el método de marcación más idóneo, en función de tres criterios de implementación: a) costo de operación; b) plataforma tecnológica acompañante – costo de inversión; y, c) aplicabilidad en el entorno socio-cultural – costo de capacitación. Se realizó una primera tabla cualitativa que describe la implementación de cada tecnología de acuerdo a cada uno de los criterios y una segunda tabla cuantitativa que prioriza el método más idóneo.

Tabla 3. Parámetros de descripción cualitativa de los criterios de calificación, para la selección de métodos de identificación para la guadua.

Métodos de marcación	Costo de operación	Plataforma tecnológica acompañante para el sistema de documentación – costo de inversión	Aplicabilidad tecnológica en el entorno socio cultural – costo de capacitación
	Balance de masas	Balance de masas	Balance de masa
Marcación con pintura	Para cada una de los métodos de marcación, analiza el costo, teniendo en cuenta el escalamiento de su implementación en las etapas de la cadena de custodia mencionadas.	Las tecnologías acompañantes son todos aquellos equipos (hardware) y programas (software) que requiere el método de marcación para su operación. Se consideró el mínimo uso de equipos necesarios para que la plataforma sea efectiva.	El usuario que opera el dispositivo requiere de un entrenamiento y nivel de calificación diferente para cada caso. Se analiza el costo de capacitación que requieren los operarios para la implementación de la tecnología en cuestión.
Talla con martillo			
Etiquetas de código de barras o códigos QR			
Etiqueta tipo puntilla			
Tarjetas magnéticas o tarjetas inteligentes			
Identificadores radio frecuencia (RFID)			
Pintura con microtaggants de nanopartículas			
Marcación por Isótopos			
Marcación Genética			

Una segunda tabla califica los métodos de manera independiente para cada criterio y se totaliza el valor que se dio a cada columna para posicionarla como la tecnología de mayor aplicabilidad. Las tres columnas recibieron el mismo peso para la sumatoria final. Los criterios de calificación se especifican a continuación:

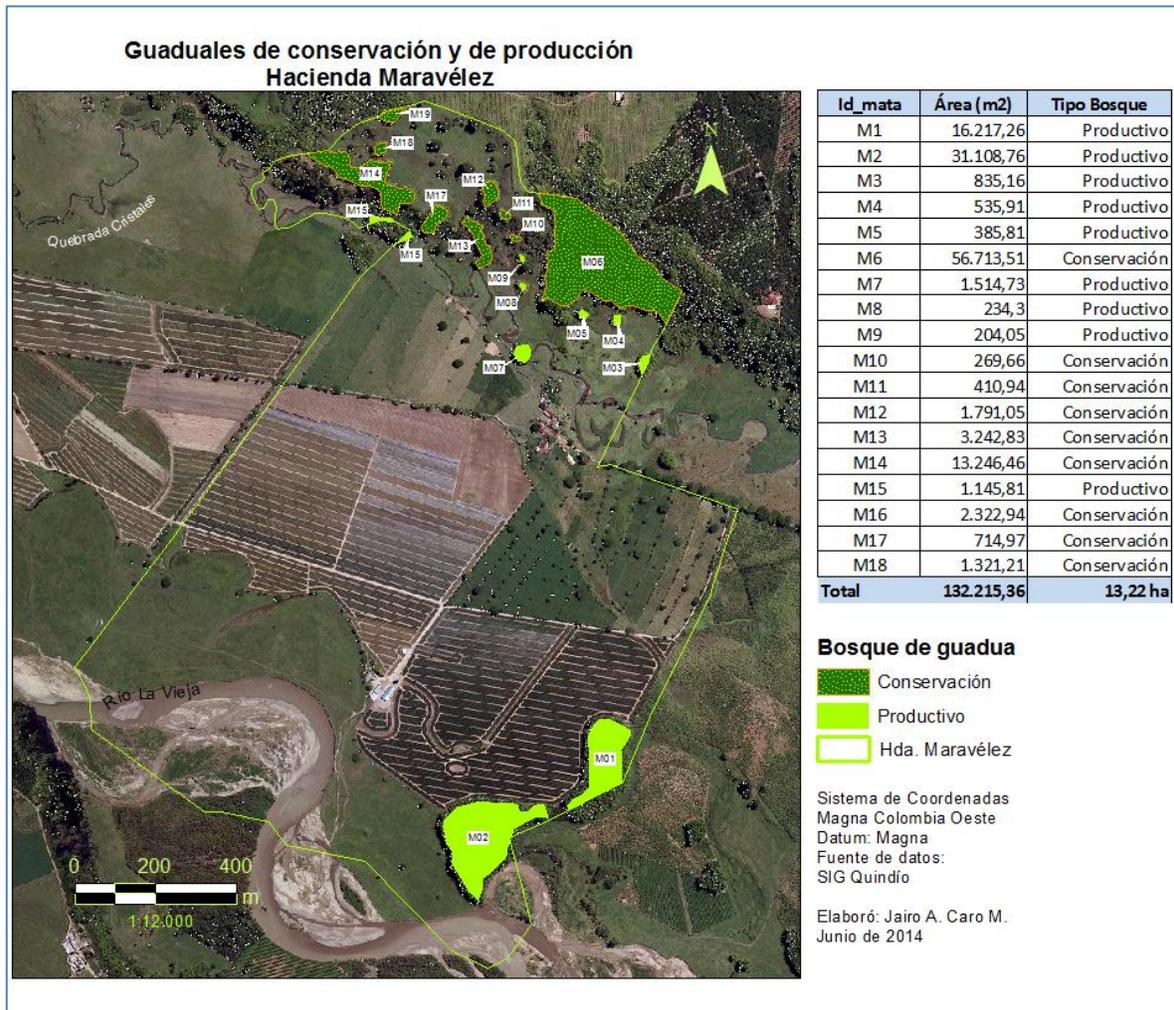
Tabla 4. Criterios de calificación cuantitativa para la selección de métodos de identificación para la guadua.

Dispositivo	Puntaje por costo de operación	Puntaje plataforma tecnológica acompañante – costo de inversión	Puntaje aplicabilidad en el entorno socio-cultural – costo de capacitación	Total
Metodo 1	Se da mayor valor al criterio de menor costo. Cero, no aplica, 1 el más costoso, dos un método económico pero costoso a nivel de escala y 3, de menor costo en economía de escala.	El mayor grado de complejidad del sistema acompañante se castiga con el menor puntaje.	Teniendo en cuenta la baja aplicación de metodologías de trazabilidad en el sector de la guadua; cuanto menor es el nivel de entrenamiento exigido para el personal, mayor puntaje.	Máximo puntaje: 9. Mínimo puntaje: 2.
Metodo <i>n</i>				

4 Resultados

4.1 Inventario forestal

4.1.1 Georreferenciación de los bosques de guadua



Mapa 3. Georreferenciación de matas de guadua en la hacienda Maravález. Departamento del Quindío, Colombia.

4.1.2 Muestreo Aleatorio por conglomerados

El marco de muestreo fueron 45 fajas, ubicadas en dos matas de guadua que suman un área de 47.326 m².

4.1.2.1 Cálculo de la intensidad de muestreo

Los datos del premuestreo señalan:

Parcela	# Tallos
1	49
2	61
3	59
4	59
Total	228
Promedio	57
Varianza	29,53
Desviación st	5,42

Área productiva de guadua: 4,7 ha

Área de parcela de muestreo: 100 m²

Densidad culmos por hectárea: 5700 culmos

Desv. Stand.: culmos por Ha. 541,6

$Z_{\alpha/2} = 1,96$

Error de muestreo propuesto: 10% = $0,1 \times 5,42 = 542$ culmos por ha

Reemplazando la ecuación (1) tenemos:

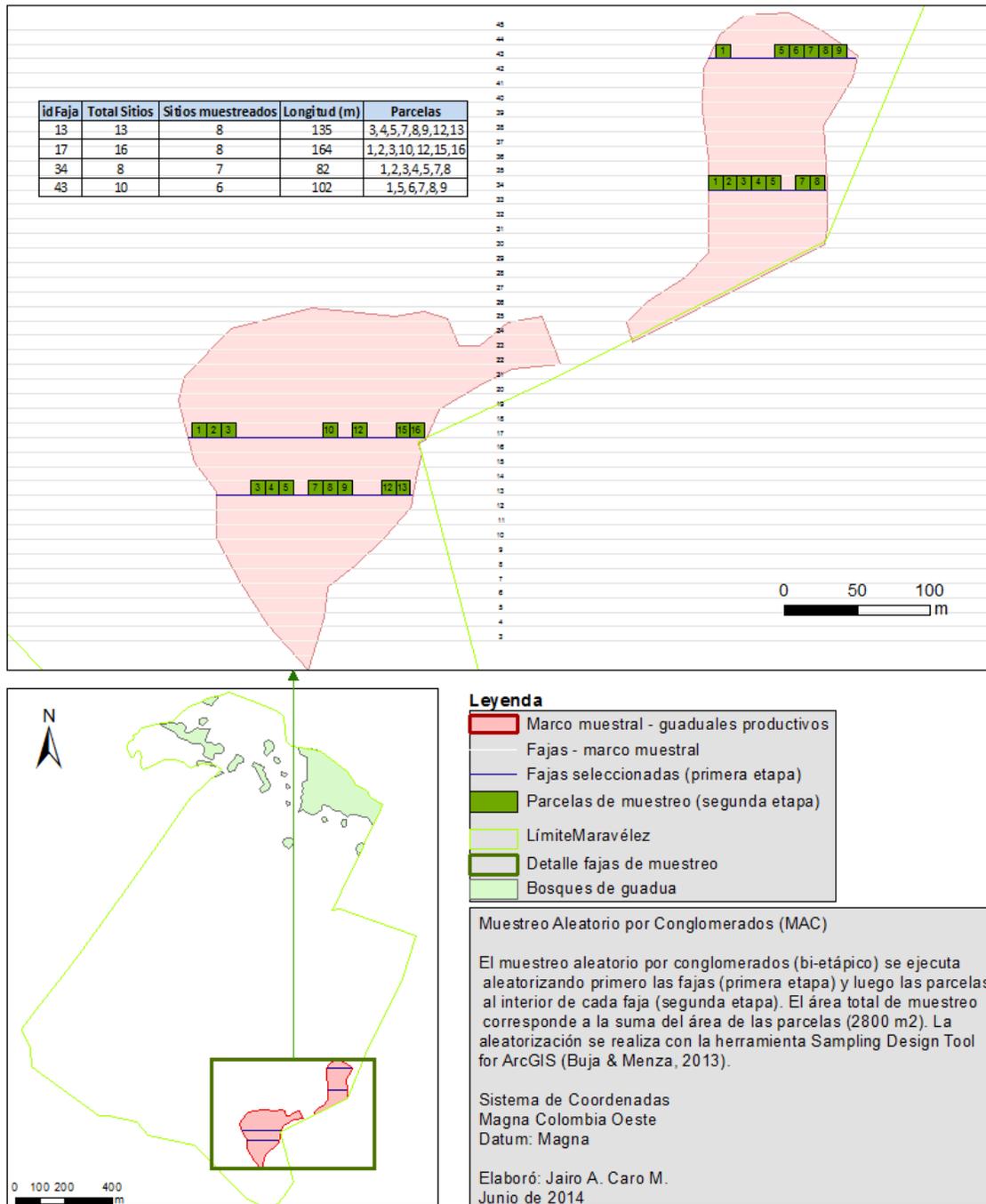
$$n = 1,962 \times 542^2 / 570^2 = 3,5 \approx 4 \text{ fajas}$$

4.1.2.2 Selección de unidades y subunidades de muestreo

En el Mapa 4 se observa el arreglo metodológico para la selección de las parcelas de muestreo. Como se mencionó en la metodología, se realizó un muestreo aleatorio por conglomerados bi-etápico. La primera etapa consideró la selección aleatoria de 4 fajas del total de 45 fajas marcadas, que cubren la totalidad del marco de muestreo (graficadas con línea gris y numeradas en el centro del mapa). La segunda etapa, corresponde a la selección aleatoria de las subunidades (las parcelas), al interior de cada faja (graficadas de color verde y numeradas en el centro). El área de muestreo debe ser mayor o igual al 5% del marco de muestreo;

la sumatoria del área de las parcelas es 2.800 m². En la tabla se señalan las fajas seleccionadas, el total de sitios por faja y la longitud de cada faja; así mismo, se indica cuántas parcelas contiene cada faja y cuáles fueron las parcelas seleccionadas en cada una de ellas.

Selección de Fajas y Parcelas de Muestreo Hacienda Maravélez



Mapa 4. Selección de unidades y subunidades de muestreo.

4.1.3 Procesamiento de datos

Tabla 5. Cálculo del área de cada faja, el número de parcelas y su promedio de individuos, para lograr el total estimado del número de culmos por faja.

		Parcelas								mi	Promedio tallos	Tamaño faja (m ²)	Mi	Tallos por faja \hat{e}
		1	2	3	4	5	6	7	8					
Faja	13	55	40	46	61	43	34	88	66	8	54,13	1350	13	703,63
	17	73	80	84	49	52	44	80		7	66,00	1640	16	1056,00
	34	80	29	45	47	26	12	75		7	44,86	820	8	358,86
	43	46	48	46	41	41	60			6	47,00	1020	10	470,00

Cálculo del total de culmos en el rodal.

$$\hat{t} = \frac{N}{n} \sum_{i \in S} \hat{t}_i$$

$$\hat{t} = \frac{45}{4} (703,63 + 1056 + 358,86 + 470)$$

$$\hat{t} = 29120,42$$

$$\hat{t}_{ha} = \frac{29120,4}{4,73} = 6.156,54 \text{ tallos/ha}$$

Tabla 6. Cálculo de variables para la estimación de la población de guadua.

Área	4,73
N	45
n	4
T	29.120,42
t_{ha}	6.156,54
S^2_t	23736,9
$N^2 (1-n/N) S^2/n$	391022,8
$N/n \sum (1-m/M) M^2 S^2/m$	106585,5
V(t)	497608,3
EE(t)	705,4
Li	27568,5
Ls	30672,3
ERROR	5,33

4.1.4 Determinación de la población

Con base en los cálculos se determinó que el total de tallos es 29.120 con límite inferior de 27.568 y un límite superior de 30.672. El error de muestreo es de 5,33%.

4.1.5 Análisis geoestadístico

Se realizó el análisis para los datos de densidad de tallos comerciales, DAP y estados de madurez. Se efectuó análisis de las variables (univariado y bi-variado) mediante estadística descriptiva, luego se realizó el análisis exploratorio de autocorrelación espacial (semivariograma) y, finalmente, la interpolación determinística empleando el método radial tipo Spline para los datos de densidad de tallos comerciales y DAP.

4.1.5.1 Densidad de tallos comerciales

El Gráfico 8 describe las observaciones del número de tallos comerciales por parcela en las 28 parcelas muestreadas y las estadísticas de los tallos observados al interior de cada parcela. Se destaca la desviación estándar ($\pm 10,16$) y la amplia diferencia que se presenta entre el mínimo valor (8) y el máximo (51). El coeficiente de simetría (skewness) superior a cero, indica una mayor presencia de los datos a la derecha de la media. La curtosis, cuyo valor es mayor a 3, indica que los datos se concentran principalmente alrededor de la media (gráfica leptocúrtica) (C. Ramírez, 2006).

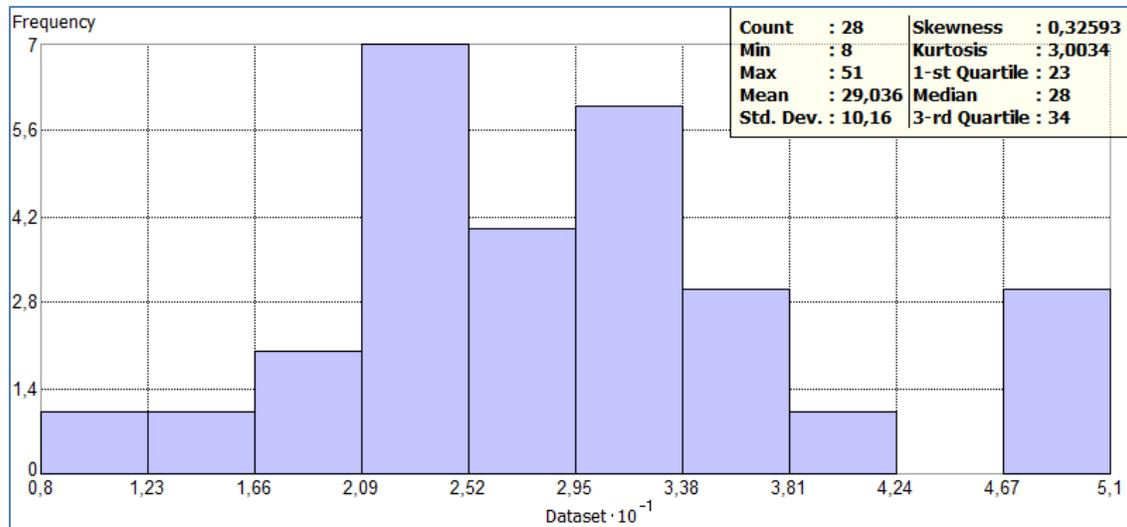


Gráfico 8. Frecuencias relativas de las observaciones del número de tallos comerciales por parcela. Se incluye el cuadro resumen de las estadísticas.

El mayor número de observaciones se presentó entre 25,2 y 33,8 tallos por parcela que, sumados, representan el 68% de los datos (Gráfico 8 y Gráfico 9).

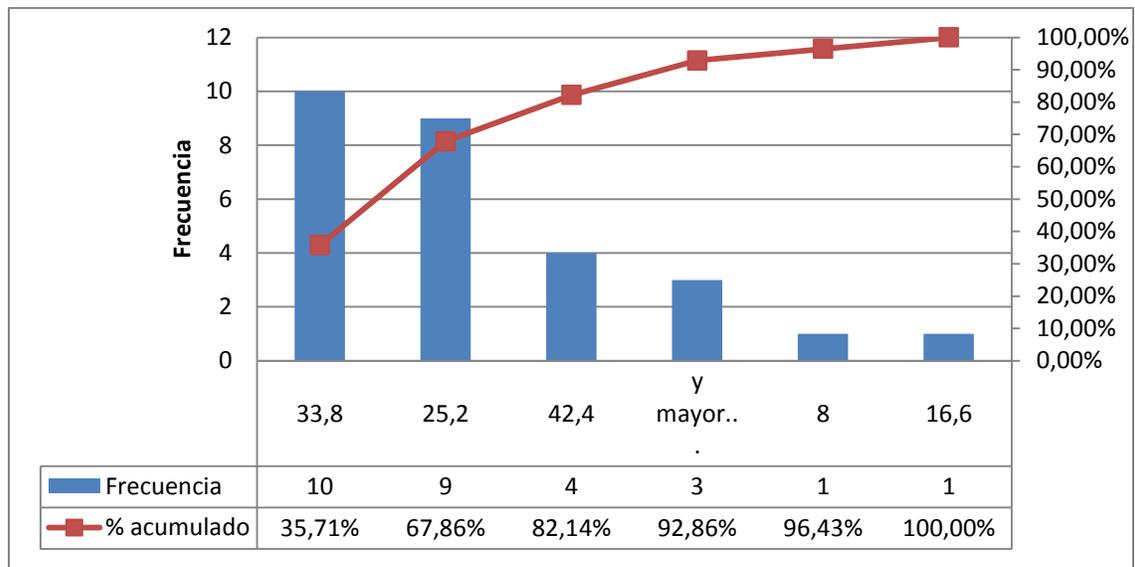


Gráfico 9. Frecuencias relativas y porcentaje acumulado de densidad de tallos comerciales por parcela. Valores en x, densidad de tallos. Valores en y, número de parcelas observadas con dichas clases de densidad.

4.1.5.2 Análisis de autocorrelación espacial tallos comerciales

Como parte de la exploración de los datos, se realizó el análisis de semivarianza o análisis estructural, el cual determina las características de continuidad de los datos estudiados, a través del ajuste visual del semivariograma experimental a un modelo teórico (C. Ramírez, 2006). Los gráficos siguientes (Gráfico 10 y Gráfico 11) fueron la base para el análisis estructural, contienen la misma información y difieren únicamente en la selección de los datos que son comparados (selección de color azul). En cada gráfica se presentaron dos semivariogramas que difieren en la orientación del análisis (búsqueda de anisotropía). Los semivariogramas superiores (tanto en gráfico 10 como en gráfico 11) analizan el comportamiento de los datos en sentido NW-SE y los inferiores, en sentido NE-SW. Los datos ingresados son los mismos, (number of lags) 10 parejas de datos, con una separación de 50 m (lag size). En ambas gráficas (10 y 11) se observa que existen *valores similares* tanto entre parcelas cercanas como entre parcelas distantes. Cabe recordar que el valor de semivarianza (eje-y) es el que determina la disimilaridad entre parejas de puntos, y entre mayor es el valor en el eje-y, mayor es la varianza entre los valores comparados. El Gráfico 11 presenta *valores muy diferentes* entre parcelas cercanas y entre parcelas muy alejadas, independientemente de la dirección en que se analicen. Nótese que los puntos seleccionados en el semivariograma, en color azul, reflejan la conexión en línea azul en el mapa.

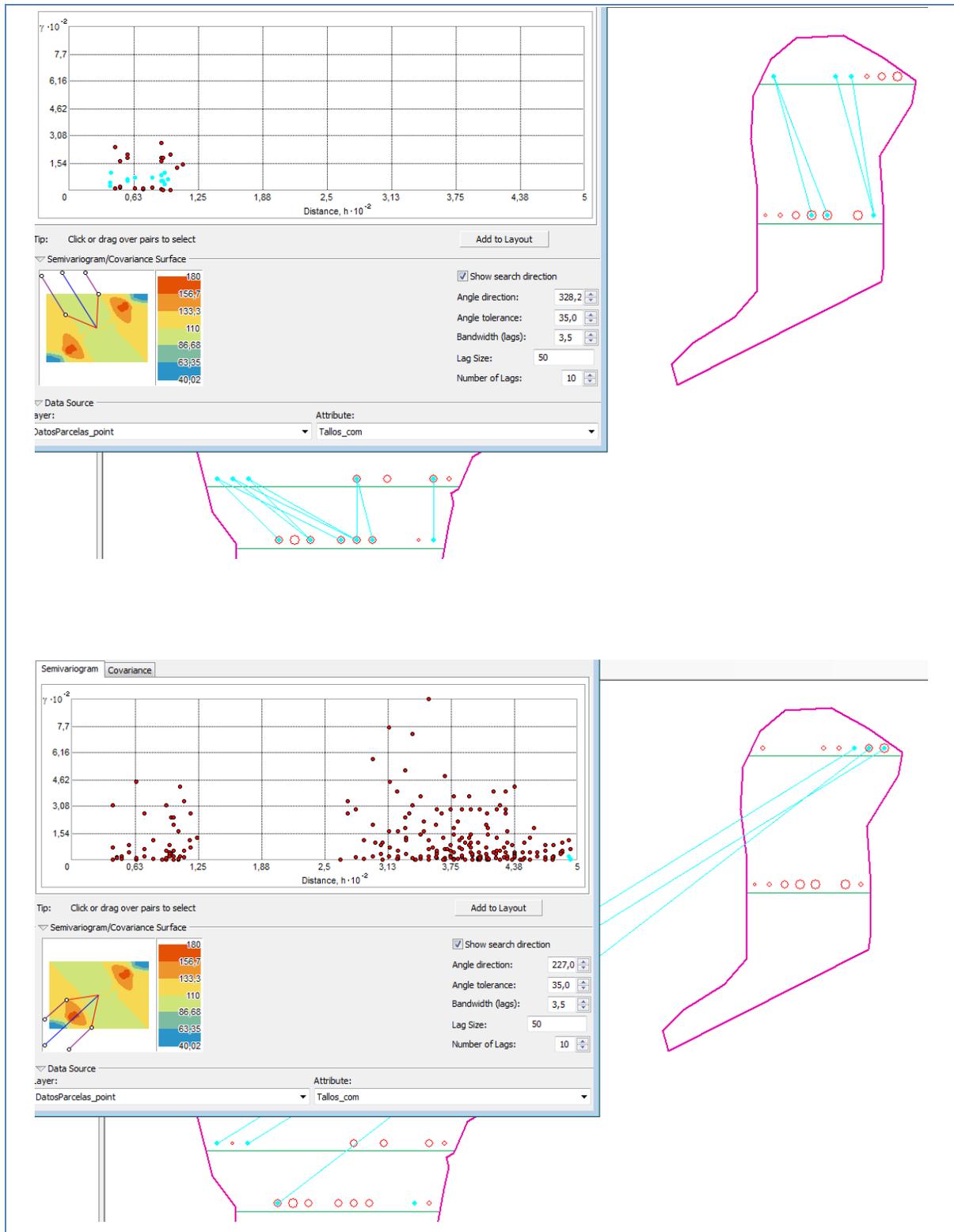


Gráfico 10. Semivariograma a partir de la densidad de tallos por parcela. Se conectan en línea azul las parcelas con valores similares, tanto si cercanas (sup) como si lejanas (inf).

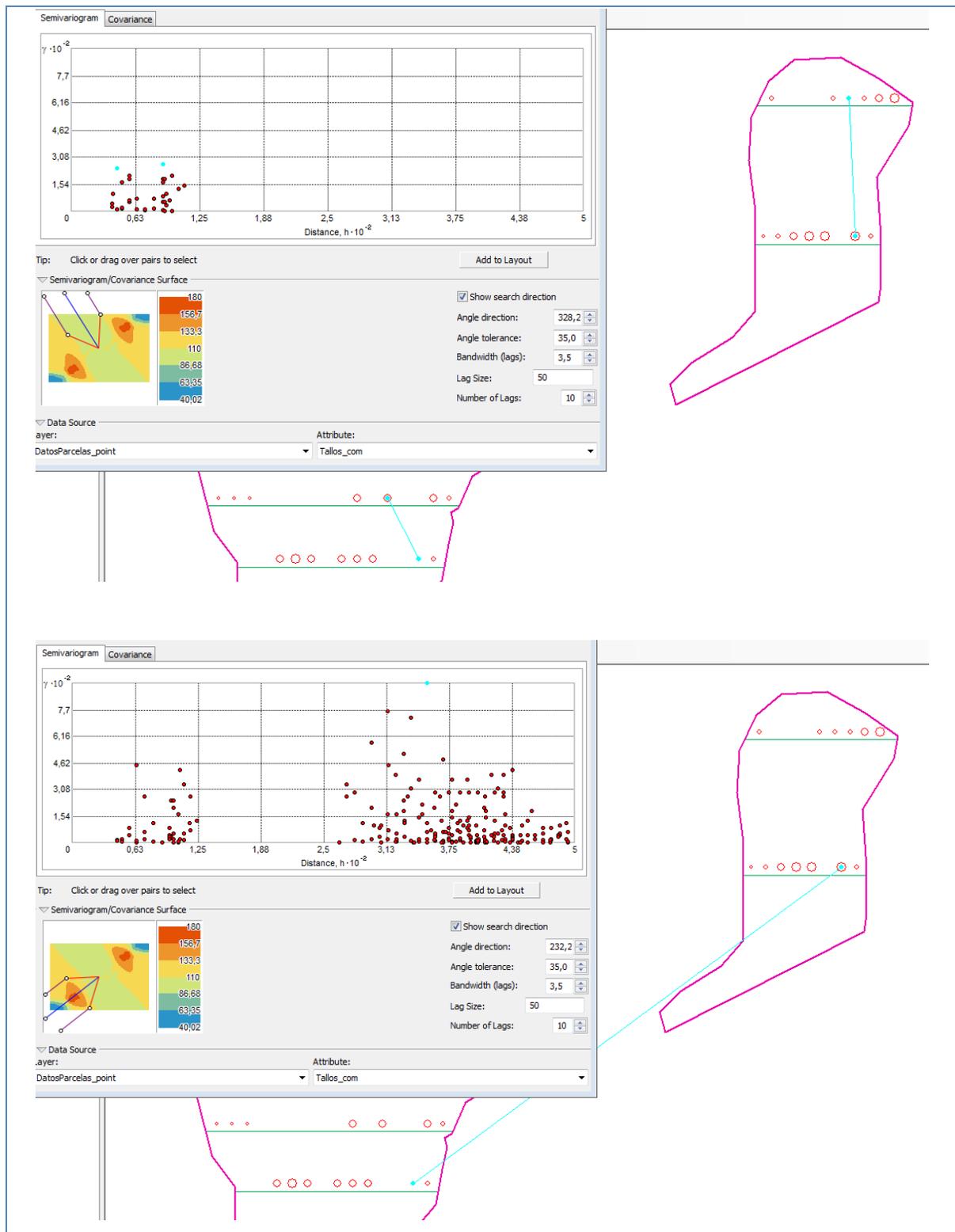


Gráfico 11. Semivariograma a partir de la densidad de tallos por parcela. Se conectan las parcelas disímiles, tanto si están cercanas (sup), como si están distantes (inf)

El Gráfico 12 representa el semivariograma generado por el asistente de kriging/cokriging que permite visualizar la semivarianza y ajustar los datos a un modelo empírico. La línea recta representa la no autocorrelación espacial, o ruido blanco, que describe un fenómeno aleatorio sin correlación entre las muestras (C. Ramírez, 2006).

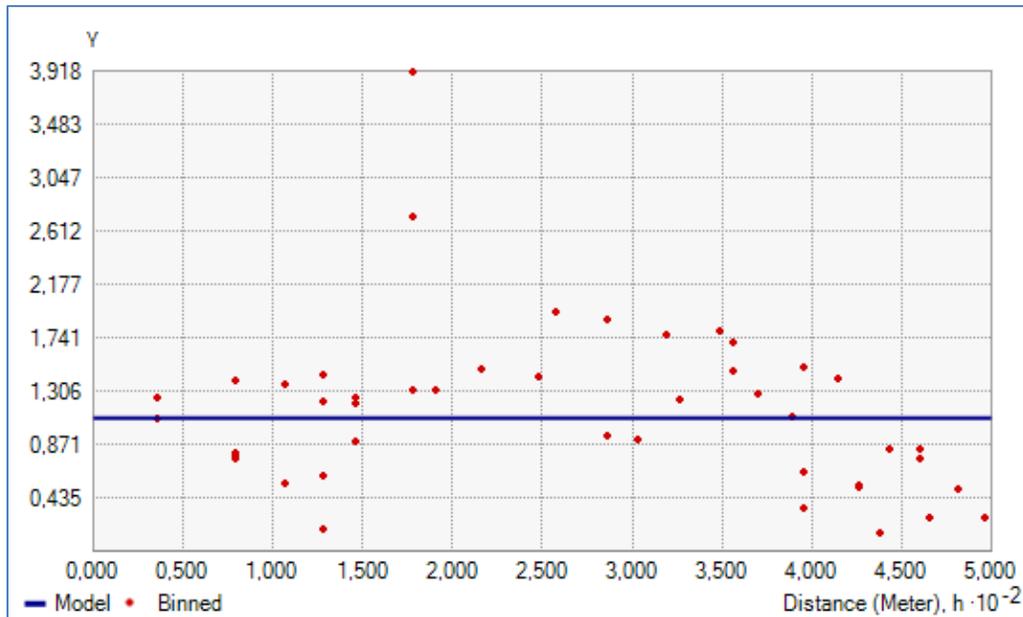


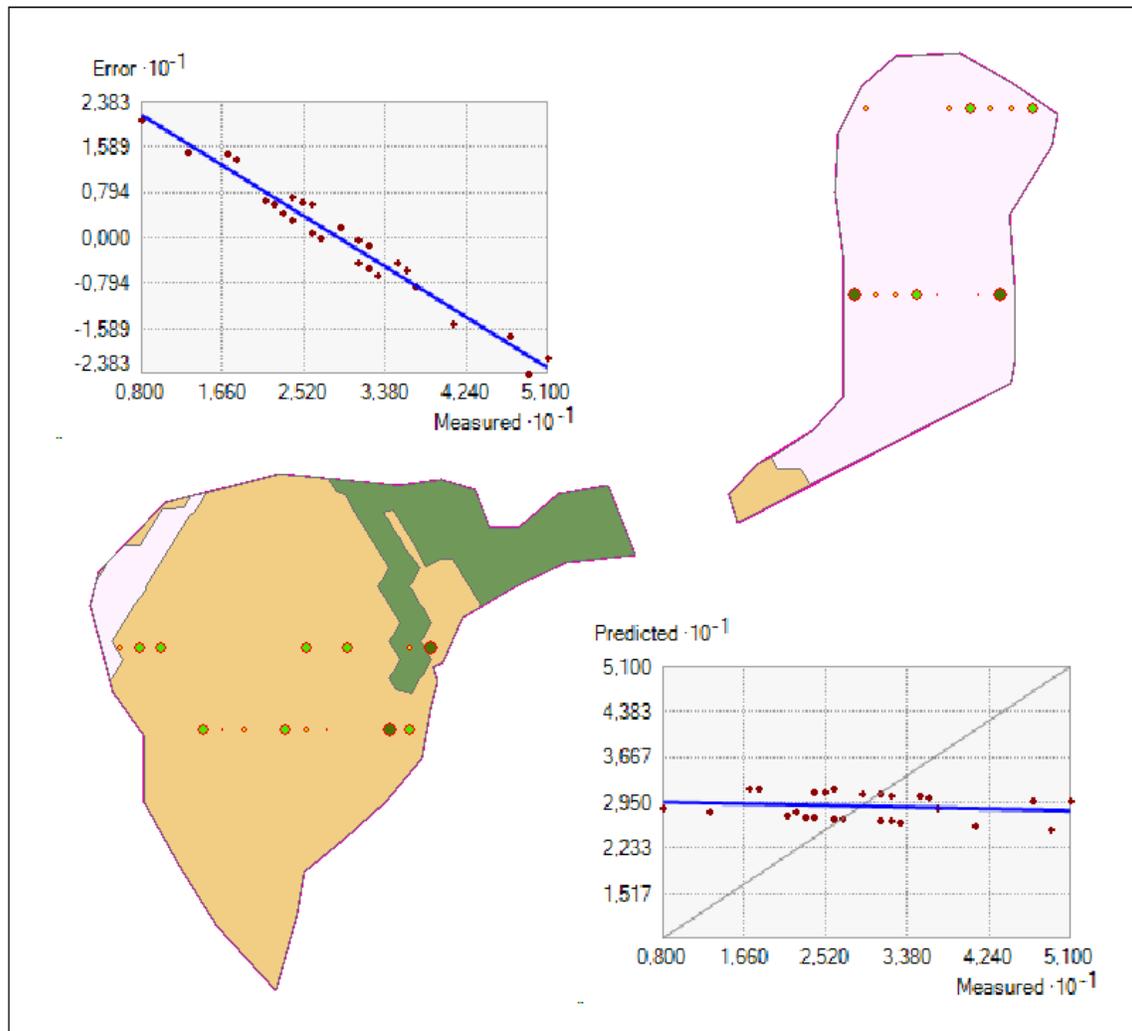
Gráfico 12. Semivariograma a partir de los datos de densidad de tallos.

4.1.5.3 Gráfica de interpolación tallos comerciales

Más adelante se puede observar el Mapa 5, elaborado a partir del método de interpolación determinística radial tipo Spline. Cinco elementos se presentan en el mapa: a) los datos obtenidos en el muestreo (ver leyenda, datos muestreados en parcelas – tallos comerciales); b) los parámetros empleados para la predicción (tabla); c) el mapa con las áreas de densidad de tallos adultos o comerciales (densidad por unidad de muestreo – 100 m^2); y dos gráficos de correlación: d) el gráfico inferior derecho, ilustra los valores medidos o muestras tomadas (measured 10^{-1}), contra los valores interpolados (predicted 10^{-1}); y e) el gráfico en la esquina superior izquierda presenta el valor muestreado (eje-x) contra el error interpolado (RSMPE) en el eje-y.

Los parámetros de la tabla fueron la mejor opción, entre un conjunto de posibles opciones evaluadas (anexo 1) para obtener el menor error de interpolación (Root-Mean-Square). Este valor varía entre 23 y -23 aproximadamente. El error ideal es 0. Los valores estimados se presentan en la gráfica inferior derecha, fluctuando sobre la línea azul que es el valor medio del conjunto de valores interpolados.

Para efectos prácticos, los valores de densidad de tallos comerciales fueron agrupados en 3 clases de densidad, procurando facilitar la selección de áreas relativamente homogéneas, para el manejo específico por sitio.



Kernel Function	Inverse Multiquadric
Kernel Parameter	1,18E-38
Neighborhood type	Standard
Maximum neighbors	15
Minimum neighbors	10
Sector type	1 Sector
Angle	0
Major semiaxis	133,1352696
Minor semiaxis	133,1352696
Anisotropy factor	1
Samples	28 of 28
Mean	-0,1300955
Root-Mean-Square	10,48104338

Datos muestreados en parcelas

Tallos comerciales

- ◊ 8,0 - 18,0
- 18,1 - 27,0
- 27,1 - 37,0
- 37,1 - 51,0

Datos predictivos

Tallos comerciales por unidad de muestreo

- 24,9-27,7
- 27,8-31
- >31

Mapa 5. Estimación del número de tallos comerciales por unidad de muestreo, empleando el método determinístico radial Spline. Ver detalles en el texto.

4.1.5.4 Diámetro a la altura del pecho (DAP)

En el Gráfico 13 se observan los datos de máximos y mínimos de DAP. En una misma parcela se presentaron valores mínimos de 9 cm y máximos de 18 cm de diámetro, y la media móvil, fluctuó entre 14 y 16 cm con algunos valores muy por debajo de estas cifras. De forma complementaria, la Gráfico 14 señala que la mayor frecuencia observada para los valores promedio DAP por parcela fue de 15,2 a 14,3 cm (71% de los datos). En la gráfica 10 se observa que el coeficiente de simetría (skewness) es negativo, lo cual determina que los datos están principalmente a la izquierda de la media (C. Ramírez, 2006).

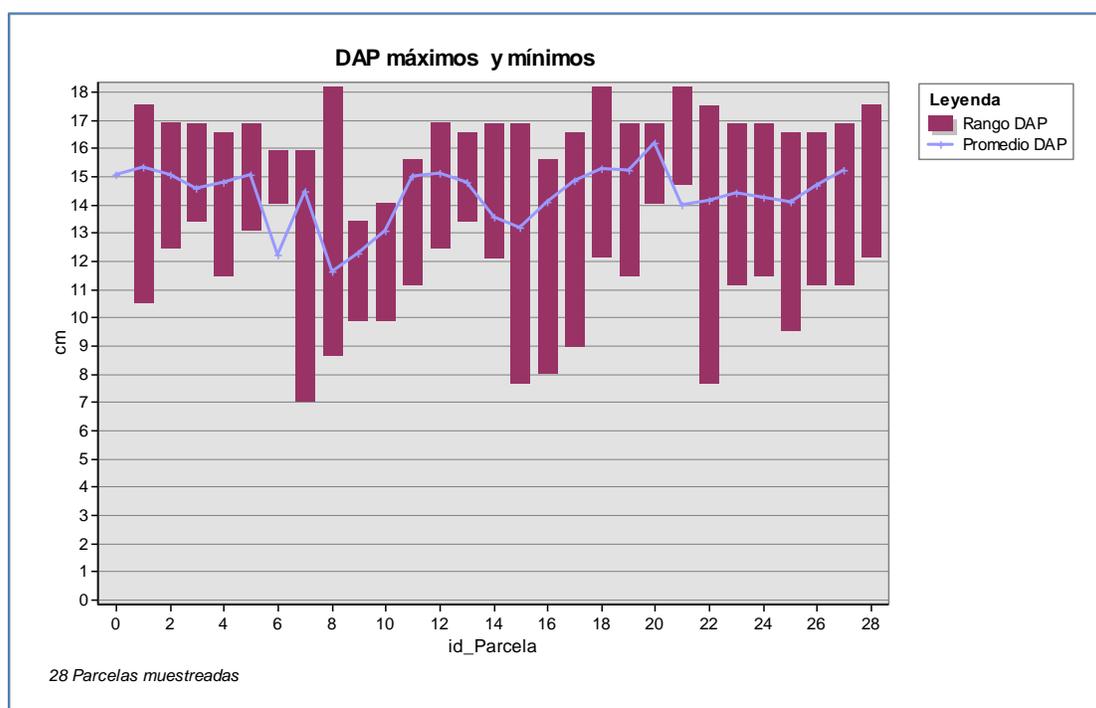


Gráfico 13. Diámetros máximos y mínimos por parcela. La línea describe la media móvil. Valores en el eje y en cm.

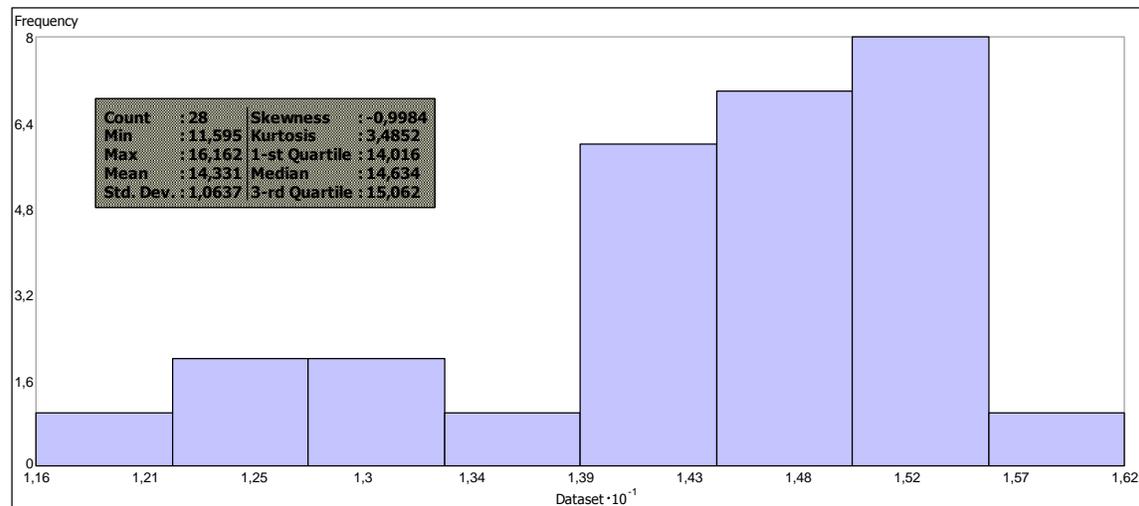


Gráfico 14. Frecuencia relativa de clases diamétricas promedio por parcela. Valores de DAP (eje-x) en cm.

4.1.5.5 Análisis de autocorrelación espacial para los datos de DAP

La exploración de la semivarianza para los datos de DAP (Gráfico 15 y Gráfico 16) tiene un comportamiento similar a los datos de cantidad de tallos comerciales por parcela. Se presentan valores elevados de semivarianza tanto en parejas de datos cercanos, como lejanos (puntos seleccionados en la Gráfico 15); sin embargo, el modelo describe que esta variable es regionalizada. En el Gráfico 16, semivariograma generado por el asistente de kriging/cokriging, la línea azul (el modelo) alcanza el umbral a los 100m aproximadamente, lo cual señala la distancia en que los datos presentan un fenómeno de autocorrelación espacial. Debido a la heterogeneidad de los datos, solamente algunos puntos están bajo la curva del modelo y la gráfica no es concluyente puesto que puede estar afectada por los valores extremos (lag size: 10, lag distance: 25).

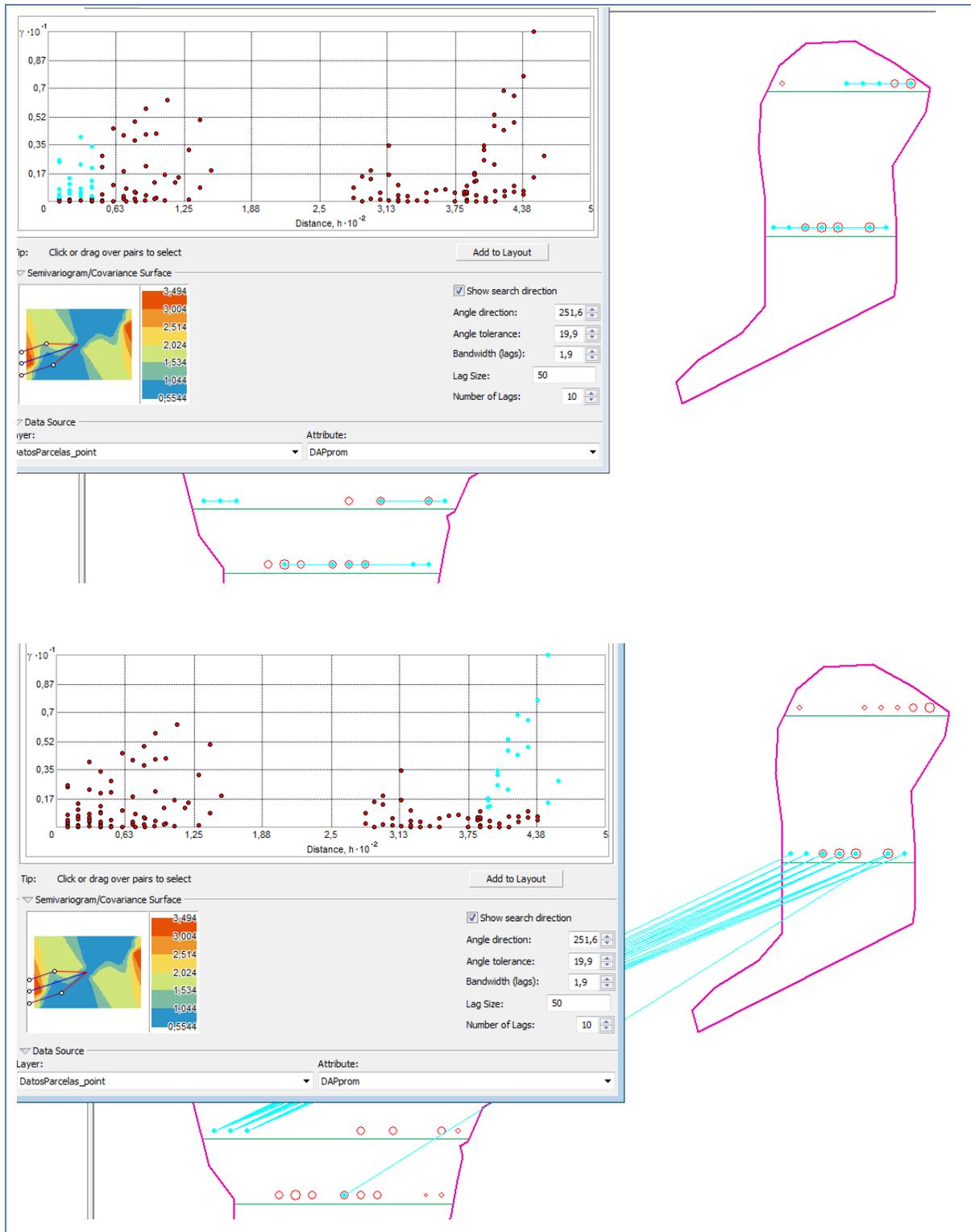


Gráfico 15. Semivariogramas a partir de los valores del DAP. Se observa un rango amplio de semivarianza (disimilitud) tanto para valores cercanos (sup) como distantes (inf).

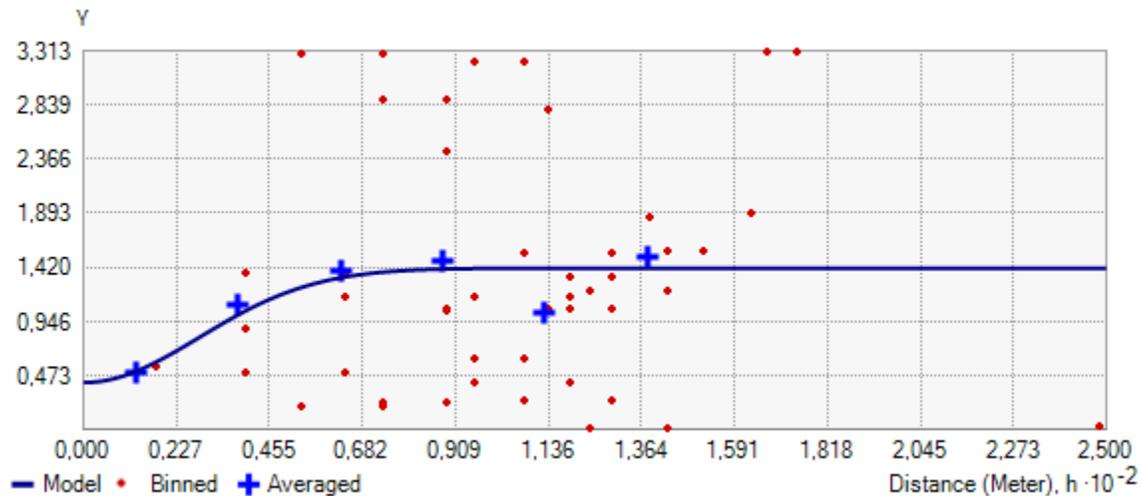


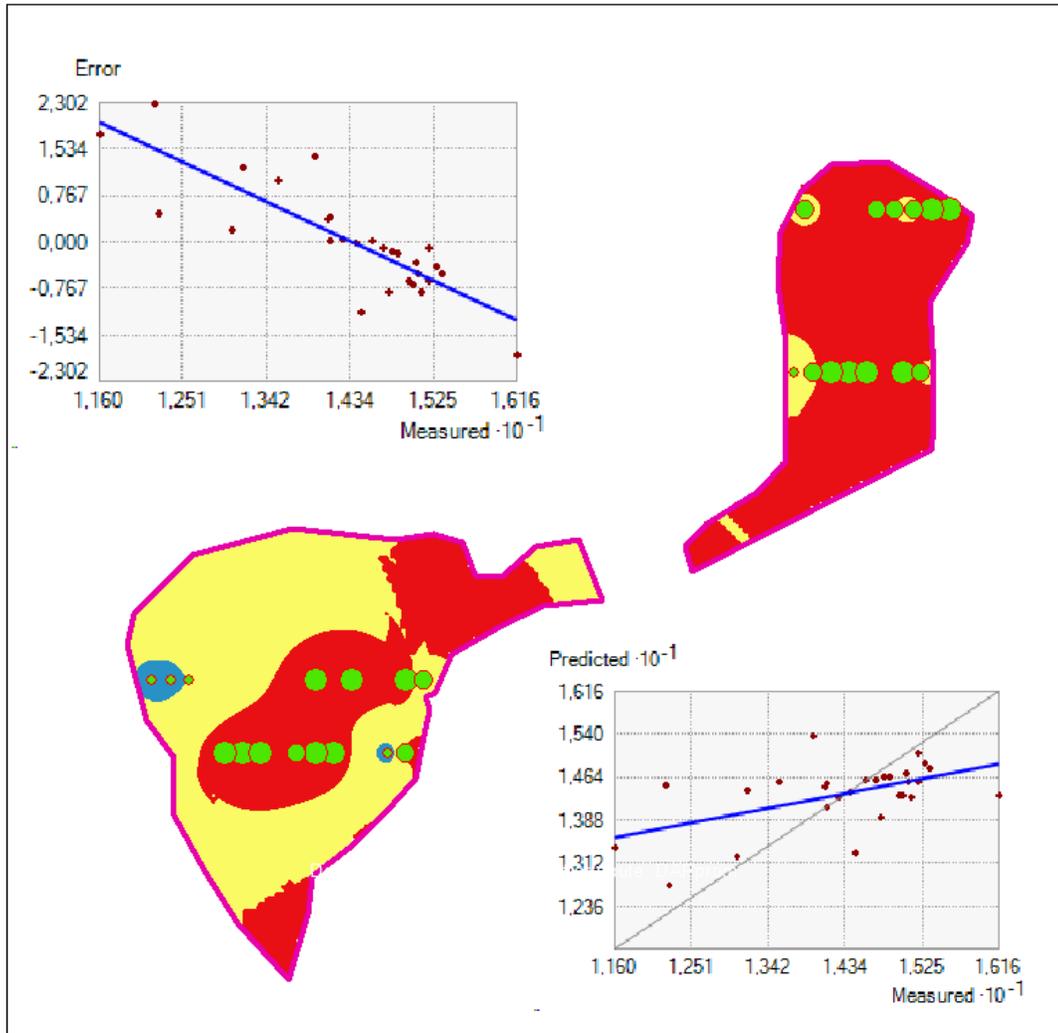
Gráfico 16. Semivariograma a partir de datos de DAP, generado en el asistente de kriging/cokriging (lag size=25, number of lags=10).

4.1.5.6 Gráfica de interpolación DAP

El Mapa 6 expresa la interpolación determinística radial tipo Spline para los datos de DAP muestreados. Se presentan, al igual que en mapa anterior, cinco elementos: a) los datos obtenidos en el muestreo (DAP promedio de cada parcela expresado en cm); b) los parámetros definidos para realizar la interpolación (tabla en la esquina inferior derecha); c) mapa donde se predice la distribución de los tallos de guadua en relación al DAP; y dos gráficos de correlación: d) el gráfico inferior derecho, ilustra los valores medidos o muestras tomadas (measured 10^{-1}), contra los valores interpolados (predicted 10^{-1}); y e) gráfico en la esquina superior izquierda, presenta el valor muestreado (eje-x) contra el error interpolado (RSMPE) en el eje-y.

Los parámetros de la tabla arrojaron un error de interpolación (Root-Mean-Square) cercano a cero. El gráfico superior izquierdo muestra que los valores del error varían entre 2,3 y -1,7 aproximadamente, mucho más cercanos al valor muestreado que lo ocurrido en la gráfica de interpolación del número de tallos. Los valores estimados se presentan en la gráfica inferior derecha, fluctuando sobre la línea azul, que es el valor medio del conjunto de valores interpolados.

Para efectos prácticos, los valores fueron agrupados en 3 clases de DAP, las cuales se presentan en el mapa.



Spline	
Kernel Function	Inverse Multiquadric
Kernel Parameter	5,959254904
Neighborhood type	Standard
Maximum neighbors	15
Minimum neighbors	10
Sector type	1 Sector
Angle	0
Major semiaxis	133,1352696
Minor semiaxis	133,1352696
Anisotropy factor	1
Samples	28 of 28
Mean	0,020492446
Root-Mean-Square	0,88567399

**Datos del muestreo
DAP promedio (cm)**

- 11,6 - 13,2
- 13,3 - 14,6
- 14,7 - 16,2

**Datos interpolados
Spline Inv. Multiquadric
DAP estimado en cm**

- 11,6 - 12,9
- 13 - 14,3
- 14,4 - 16,1

Mapa 6. Interpolación de datos para el DAP, empleando el método determinístico radial Spline. Ver detalles en el texto.

4.1.5.7 Correlación entre DAP y densidad de tallos

La siguiente pareja de gráficos de dispersión (Gráfico 17) presentan, a la izquierda, la correlación entre el total de tallos observados (eje-x) *versus* los tallos comerciales (eje-y); y en el gráfico de la derecha, la correlación entre el total de tallos (en el eje-y) *versus* el diámetro a la altura del pecho (DAP).

Mientras los tallos comerciales presentan una relación directa, es decir, a mayor número total de tallos, mayor número de tallos comerciales; la gráfica derecha ilustra una relación inversa, a mayor número de tallos, menor el DAP observado.

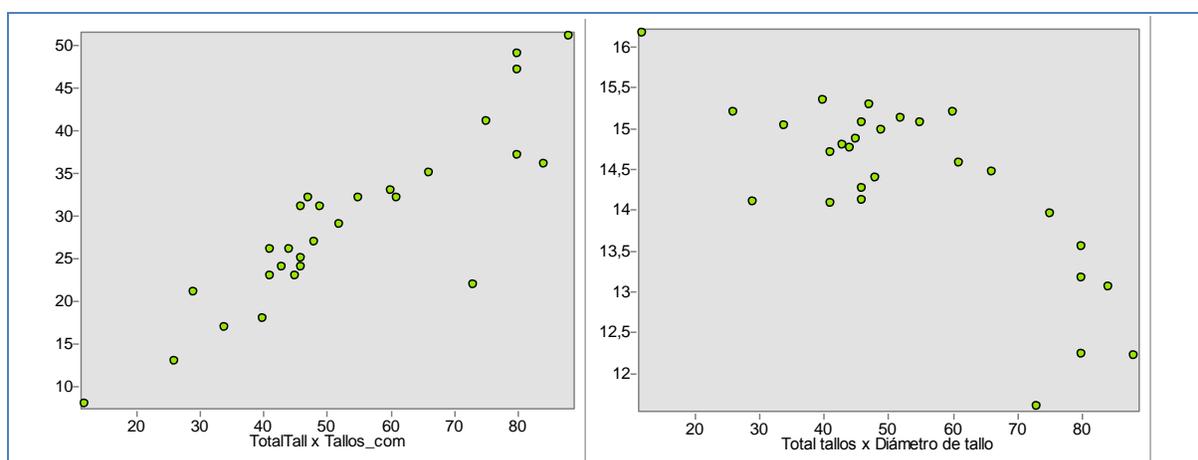


Gráfico 17. Correlación entre el total de tallos por parcela y los tallos comerciales (gráfica izq) y, correlación entre el total de tallos y el diámetro (promedio) a la altura del pecho por parcela (gráfica der.)

4.1.5.8 Estados de madurez

Se presentan en el Gráfico 18 los valores mínimos, máximos, promedios (línea punteada) y cuartiles para cada clase de estado de madurez: renuevos, verdes, maduros, sobremaduros y secos. Contrasta el reducido valor del número de renuevos contra el mayor de sobremaduros. El gráfico señala también la presencia de un número importante de tallos secos. Los tallos maduros y sobremaduros se grafican conjuntamente en la caja de color blanco, para señalar el total de tallos comerciales.

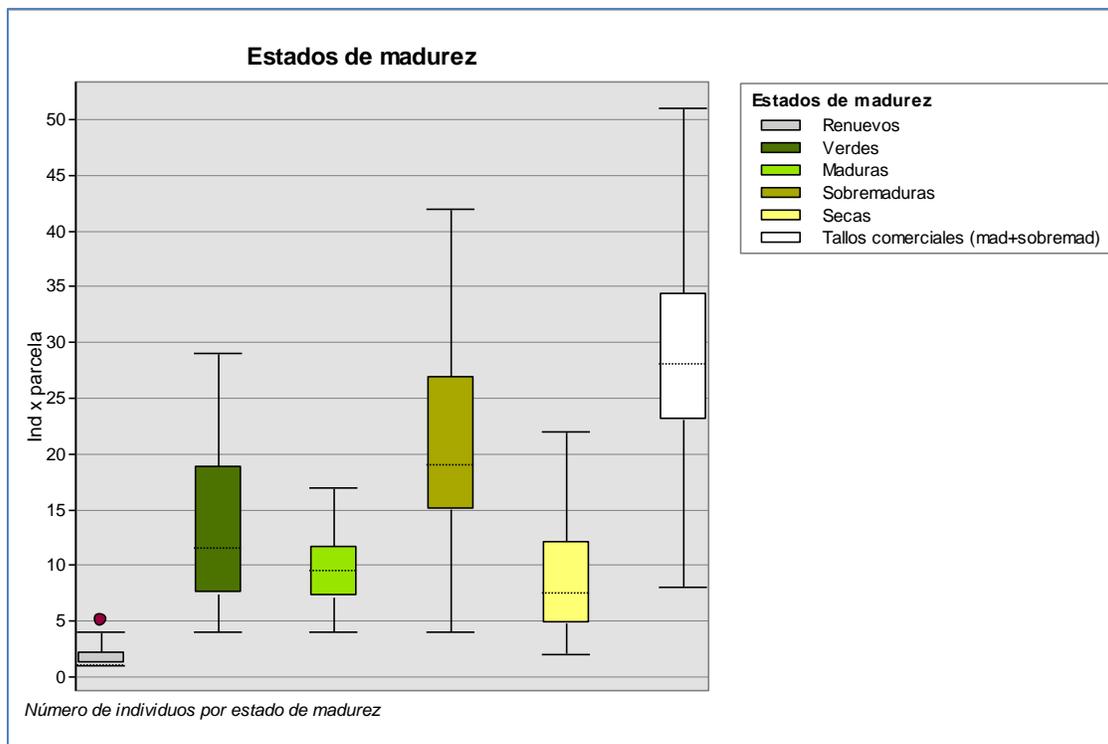


Gráfico 18. Valores máximos mínimos y promedios de los individuos observados en las parcelas agrupados por estados de madurez. La columna tallos comerciales es la suma de los tallos maduros y sobremaduros.

En el siguiente gráfico se describe la proporción de tallos por estado de madurez. Se destaca nuevamente el reducido número de renuevos en contraste con un elevado número de tallos secos. Los tallos comerciales suman un 57%, mientras que los juveniles (renuevos y verdes) representan el 27%. Las matambas son tallos de guadua de diámetros muy reducidos que no son empleadas para construcción; este grupo contabilizó el 1%.

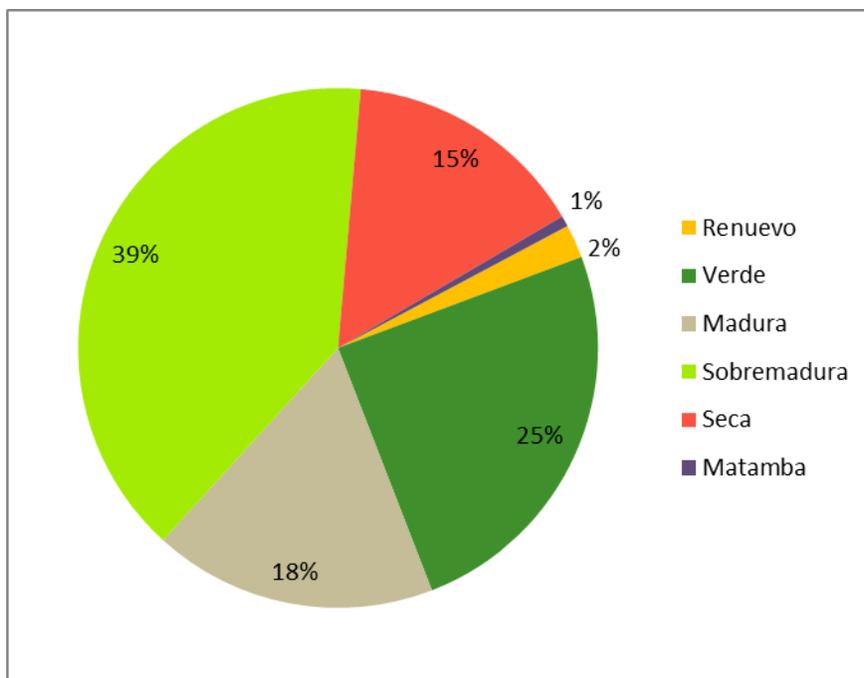


Gráfico 19. Porcentaje de tallos por estado de madurez.

4.2 Análisis costo-beneficio

Tabla 7. Descripción del costo (operación, inversión y de capacitación) que exige cada uno de los métodos de marcación considerados para tallos de guadua.

Método de marcación	Costo de operación	Plataforma tecnológica acompañante- costo de inversión	Aplicabilidad tecnológica en el entorno-socio cultural – costo de capacitación	Fuentes
Marcado con pintura	El costo de aplicación es 0,17 centavos de dólar por tallo. Se señala en los estudios que el costo mayor se asocia al operario que marca, mientras el costo del material es mínimo.	Registro mediante planillas en papel. Empleo de tablas de Excel para consolidar información. Cobro de licencia de software.	Competencias básicas en registro y sistematización de datos. Control básico en el registro de procesos.	(Dykstra et al., 2002; Rodríguez et al., 2011; Timpe, 2005)
Talla con martillo	No Aplica. Los tallos de guadua son muy resistentes para poder grabar la talla; el material se rajaría.			
Etiquetas de código de barras o códigos QR	Empleo de un único código por lote de corte. Costos entre US\$0,05-0,3 por etiqueta, varía de acuerdo al material de la etiqueta (papel plastificado, plástico –varios calibres- y metal).	Funciona con un lector o terminal para código de barras (puede emplear un celular) que sincroniza información con una hoja de Excel u otros sistemas de información (bases de datos).	El operario hace lectura o registro de cada tallo con una capacitación sencilla en la operación del lector o terminal.	(Cunha et al., 2010; Dykstra et al., 2002; Tzoulis & Andreopoulou, 2013)
Etiquetas puntilla	No aplica. Son empleadas en tallos macizos. La guadua es un elemento hueco; este marcador puede afectar el material.			
Tarjetas magnéticas y tarjetas	Aplica para registrar la información de la totalidad del lote o conjunto de lotes. Los costos	Requiere lectores y equipos para registro costosos (no móviles) y un software	Exige nivel de coordinación importante porque este tipo de tarjetas totaliza información.	(Dykstra et al., 2002)

Método de marcación	Costo de operación	Plataforma tecnológica acompañante- costo de inversión	Aplicabilidad tecnológica en el entorno-socio cultural – costo de capacitación	Fuentes
inteligentes.	varían entre US\$1-20 por tarjeta.	especializado.	Exige entrenamiento especializado.	
Identificadores de radio frecuencia – RFID	Depende del tipo de tag a emplear (activos o pasivos) y del material en que se elaboran. Pasivos US\$0,25-1. Activos US\$10-100.	Exige antenas y terminales que implican un costo elevado de inversión. Los lectores son específicos y deben ser programados.	Tiene un elevado nivel tecnológico a nivel de programación e instalación del sistema. La operación no representa costos de entrenamiento, puesto que la lectura es automática.	(Björk et al., 2011; Cunha et al., 2010; Timpe, 2005)
Pintura con microtaggants de nanopartículas	US\$127 por botella de 8 onzas (225 ml) aplicable a 2000 piezas (US\$0,065). La aplicación se puede realizar en etiquetas convencionales (US\$0,09-0,12) elevando el costo de la etiqueta entre un 10 y un 80%	Costos de inversión elevados para el desarrollo del microtaggant. Lectores de bajo costo (linternas UV o rayo láser).	No requiere nivel de capacitación elevado para los operarios.	(Dykstra et al., 2002)
Marcación química interna (isótopos)	Costo del análisis: €350 por muestra. No es método de marcación, es de verificación del origen y la calidad.	Requiere altos costos de inversión para crear una base de datos confiable de firmas isotópicas por localidad.	Requiere el establecimiento de laboratorios para su lectura, o el envío de muestras a laboratorios especializados.	(Seidel et al., 2012)
Marcación genética	Funciona como método de conciliación. Cada análisis tiene	Costo de instalación asciende a US\$30.000	Existen trabajos que potencialmente permitirían	Trabajos en caracterización

Método de marcación	Costo de operación	Plataforma tecnológica acompañante- costo de inversión	Aplicabilidad tecnológica en el entorno-socio cultural – costo de capacitación	Fuentes
	un costo aproximado de US\$750 por 1000 m ³ de madera		reducir estos costos de los perfiles genéticos. La toma de muestras no exige entrenamiento especializado.	genética de guadua (Londoño & Muñoz, 2011; Torres et al., 2009) Trabajo que describe experiencias trazabilidad a nivel genético (Seidel et al., 2012)

Tabla 8. Calificación de los métodos de marcación. C.O= Costo de operación; C.I.= costo de inversión; y C.C.= costo de capacitación

Método de marcación	C.O.	C.I.	C.C	Total
Marcado con pintura	3	3	3	9
Talla con martillo	0	0	0	0
Etiquetas de código de barras o códigos QR	2	2	2	6
Etiquetas tipo puntilla	0	0	0	0
Tarjetas magnéticas y tarjetas inteligentes.	2	1	1	4
Identificadores de radio frecuencia – RFID	1	1	2	4
Pintura con microtaggants de nanopartículas	3	2	3	8
Marcación química interna (isótopos)	1	1	1	3
Marcación genética	1	1	3	5

La Tabla 8 resume la calificación que recibió cada uno de los métodos analizados, siendo el método de marcación con pintura el que recibió mayor puntuación. Siguen en orden, la marcación pintura con nanopartículas, y, en tercer lugar, la marcación con etiquetas de códigos de barras o códigos QR.

Dos métodos de marcación recibieron cero (0) puntos por cuanto no son aplicables al material guadua.

5 Análisis de resultados

5.1 ¿Qué ventajas y desventajas presenta el uso de imágenes de satélite para la espacialización y mapeo de los rodales productivos de guadua?

El empleo de imágenes satelitales es una ayuda muy importante para la localización de los guaduales. Es eficaz y sirve de orientación para el trabajo de campo. Una ventaja importante que se presentó fue que las imágenes disponibles de SIG Quindío (CRQ, Gobernación del Quindío, & IGAC, 2012) tienen mínima nubosidad, lo cual permitió identificar sin interrupción visual el área de estudio y georreferenciar cada una de las áreas cubiertas con guadua. Si bien las imágenes del SIG Quindío no permiten un análisis espectral para desarrollar reconocimiento supervisado de los guaduales, debido a su formato (WMS), la dominancia de la especie en el dosel permite un proceso de reconocimiento sencillo.

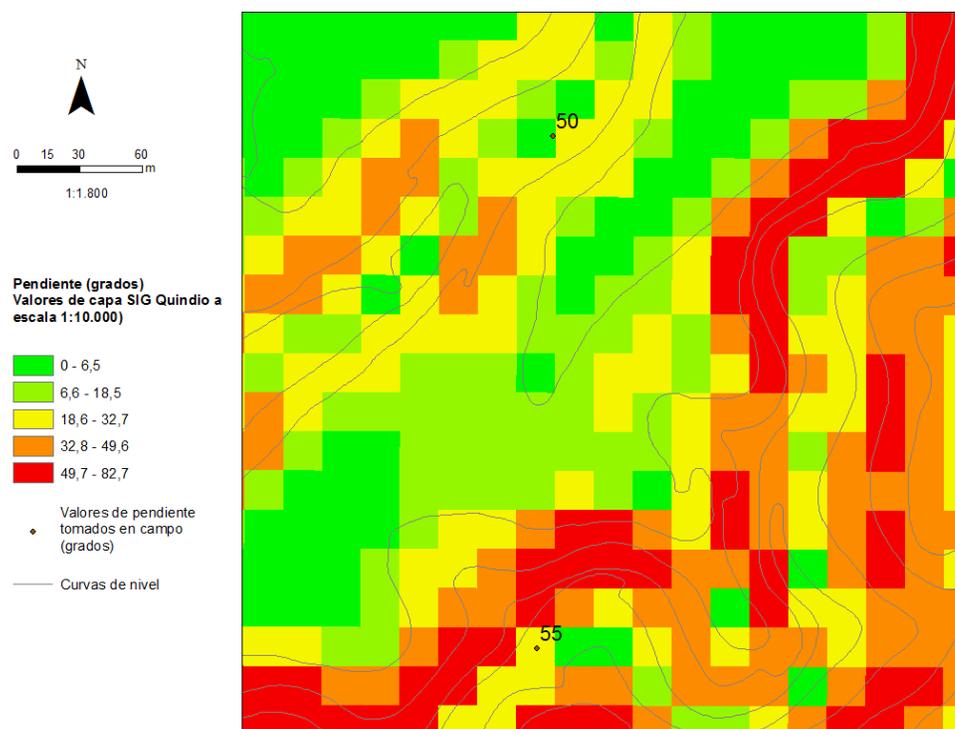
Kleinn y Morales (Kleinn & Morales-Hidalgo, 2006) sugieren que las áreas identificadas en las imágenes se reduzcan 8,6 m del borde externo hacia adentro, para evitar que la proyección de las ramas aumente el área en un 33%. Dicho estudio analizó 230 muestras con un error estimado igual del 10,76%. Al trasladar las áreas identificadas al GPS y revisar en campo los perímetros de los guaduales, se encontraron pocas diferencias con respecto al margen identificado en la imagen del SIG Quindío.

La recomendación de reducir el área de la imagen en una distancia de 8,6 m debe tomarse como valor de referencia, pero es fundamental el empleo del GPS para la verificación en campo, puesto que el valor es aproximado y normalmente no corresponde de forma precisa con la realidad del terreno.

Por otra parte, realizar un filtro de restricción para establecer áreas de conservación es un paso obligatorio para equilibrar la producción comercial de guadua y la preservación de la biodiversidad asociada a estos bosques. Sin

embargo, el trabajo no evaluó la biodiversidad asociada a cada guadual, solamente describió la pendiente como elemento para filtrar los guaduales productivos de aquellos no productivos. En este sentido, una pendiente mayor de 45° (100%) en el terreno es no apta para actividades agrícolas o forestales y, por lo tanto, es un parámetro para diferenciar áreas de no producción. Determinar áreas de conservación implica realizar estudios más precisos sobre la diversidad y la estructura de la vegetación y la fauna asociadas a estos guaduales, elementos que no son desarrollados a profundidad en los planes de manejo, puesto que el propósito es principalmente el aprovechamiento comercial.

La identificación de áreas con inclinación mayor de 45° no se realizó de forma computarizada sino de forma manual durante el recorrido de georreferenciación. Ocurrió de esta manera porque la escala en que se encuentra la información de SIG Quindío para curvas de nivel es 1:10.000. Igualmente, observaciones realizadas en un premuestreo en el rancho La Soledad, en Montenegro, indicaron que mientras los datos de pendiente obtenidos a partir de la capa de SIG Quindío señalaban entre 6 y 30° de inclinación, las observaciones en el terreno indicaban pendientes de 50 y 55° (Mapa 7). Estas incongruencias alertaron sobre el empleo de esta capa base como herramienta para la toma de decisiones en el presente estudio, el cual debe elaborarse a escala 1:1000.



Mapa 7. Medición de pendiente en el terreno vs. información disponible a partir de capa de curvas de nivel SIG Quindío. Premuestreo realizado en el rancho La Soledad, Montenegro, Quindío.

5.2 De acuerdo a los datos de caracterización que se obtengan en las parcelas, ¿es posible determinar el mercado en que dicha guadua puede ofrecerse?

Sí es posible determinar el mercado en que la guadua de la hacienda Maravélez puede ofrecerse. A continuación se describen las consideraciones que se tuvieron en cuenta para hacer esta afirmación.

“La calidad de los productos derivados de la guadua depende directamente de la calidad de la pieza de guadua; materia prima (...) relacionada a su vez con la calidad del sitio en donde se encuentra el rodal” (García, 2004, p. 10).

Hasta comienzos del 2000, un grupo de autores (Castaño, 2002; Cruz, 1994 y Giraldo, 1999 citados en García, 2004; E. Giraldo & Sabogal, 2005) afirmaban que

las mejores condiciones de sitio para la guadua oscilaban entre los 900 y 1600 msnm, salvo Agudelo y Toro ([Agudelo y Toro, 1994 citado en García, 2004](#)), quienes afirmaron que el intervalo de mejor calidad estaba entre 1300 y 1500 msnm. A medida que los estudios han ido aportando información, este rango se ha estrechado. Los valores (de altitud) que hoy registran las mejores condiciones de sitio¹, son cercanos a los señalados por Agudelo y Toro y corresponden al intervalo comprendido entre 1200 y 1500 msnm ([García & Camargo, 2011](#)).

Los datos del presente estudio se ubican en lo que García y Camargo ([2011](#)) definen como zona grupo 3: guaduales entre los 900 y 1200 msnm, con temperaturas entre 19,7 y 21,3°C y pendientes de hasta 10%. Nótese que los datos de temperatura en este estudio (24°C) son superiores a los datos descritos en el estudio citado. En general, mayores temperaturas favorecen el crecimiento de la guadua ([García, 2004](#)), pero también es un factor limitante cuando está por encima de los 26°C. Consecuentemente, son mayores los valores de DAP hallados en el presente estudio: mientras el valor promedio del grupo 3 (definido en el estudio de García y Camargo) es de 10,54 cm, en el presente, el promedio es 14,3 cm.

Guaduas con características de óptima calidad se esperan en terrenos con pendientes entre 10 y 30° (20-60% aprox.) y alejados de fuentes hídricas (Gráfico 20). Estas condiciones generan mayor densidad de fibras vasculares y, por lo tanto, mayor resistencia físico-mecánica ([Camargo et al., 2002](#)). Los guaduales estudiados en Maravélez están ubicados en una pendiente de 0 a 3° de inclinación, en el área cercana al río, circunstancias que conllevan a una menor densidad de fibra.

¹ El concepto de calidad óptima se ha trabajado principalmente para cumplir con las demandas del sector de la construcción, que es el mercado en el que la guadua ha desempeñado un papel protagónico. Reflejo de ello, es lo que se expresa en los acuerdos de competitividad del sector ([Mejía, 2004, 2013](#)).

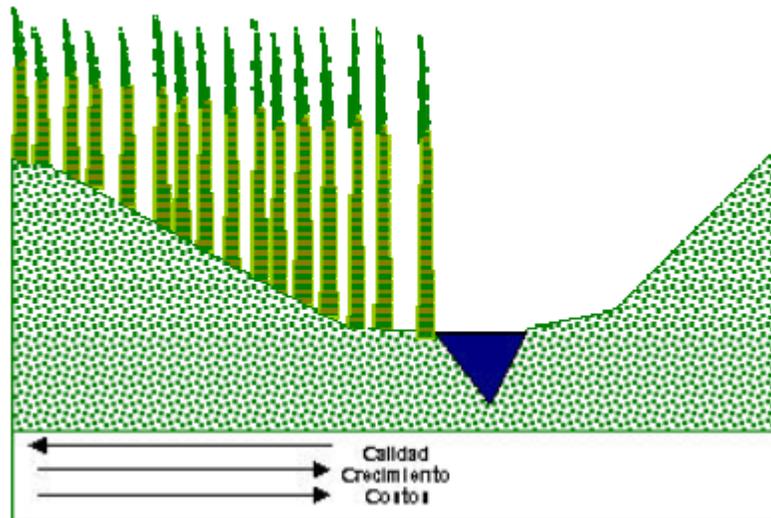


Gráfico 20. Gradientes de cambio en calidad y crecimiento de la Guadua de acuerdo a la posición geomorfológica. Fuente: (Camargo et al., 2002).

Los datos en la literatura (García & Camargo, 2011) señalan que guaduas con DAP menores a 12 cm son demandadas por los sectores de construcción y muebles; valores mayores a 12 cm son solicitados para artesanías y aquellos del orden de 17 cm, son requeridos para elaborar laminados.

En conclusión, el valor DAP promedio de las guaduas en el presente estudio es de 14,3 cm, aproximadamente. Por lo tanto, este material podrá tener mayor demanda para el sector de artesanías y/o laminados por sus características de diámetro y porque, en principio, la densidad de fibra de sus tallos es menor a la requerida en sistemas constructivos.

5.3 ¿Cuáles son las herramientas de un SIG necesarias para estimar la capacidad productiva de un rodal de guadua al nivel de finca?

Las herramientas del SIG seleccionadas en esta investigación se aplicaron con el propósito de facilitar la ejecución de cuatro etapas del plan de manejo: a) Imágenes de satélite y navegador de GPS, en la georreferenciación de los

bosques de guadua; b) la aplicación *Sampling Design Tool for ArcGIS* (Buja & Menza, 2013) en el diseño del muestreo aleatorio por conglomerados; c) histogramas de frecuencia, análisis de dispersión, en la exploración de los datos; y, d) semivariogramas y gráficas de interpolación, para definir la propuesta de manejo específica de aprovechamiento.

5.3.1 Georreferenciación de los bosques de guadua

La georreferenciación del guadua, como se discutió en la primera parte de esta sección (ver 5.1), empleó imágenes de satélite del SIG Quindío e incorporó datos de GPS para la localización del área del estudio. La imagen de SIG Quindío, cuya resolución es de 1:2000, permite la identificación de las matas de guadua de forma precisa, sin embargo, la imagen solo está habilitada para emplearse como referencia y no para la clasificación de imágenes (supervisada o no supervisada), como tampoco para el análisis espectral, con el que se realizan análisis de estrés hídrico y plagas, entre otros.

5.3.2 Diseño del Muestreo Aleatorio por Conglomerados

El uso de la herramienta *Sampling Design Tool for ArcGIS - SDTA* (Buja & Menza, 2013) es un procedimiento que facilita el trabajo de asistentes técnicos y/o autoridades locales para la selección de fajas y/o parcelas, sin el uso tradicional de la tabla de números aleatorios. Las autoridades locales pueden emplear este procedimiento y definir los puntos de muestreo para los estudios de aprovechamiento, reduciendo al mínimo la manipulación de datos.

5.3.3 Exploración de datos

En esta fase se emplearon histogramas de frecuencias y gráficos de dispersión. La exploración de datos se realizó con el propósito de conocer el estado actual de la población muestreada y seleccionar, a partir de esa información, la herramienta de interpolación más adecuada (ver siguiente sección). Las variables estudiadas fueron densidad de tallos comerciales, DAP y estado de madurez.

La densidad de tallos comerciales por parcela es una variable importante para determinar cuál es el volumen de tallos a extraer. En el Gráfico 8 se observan valores extremos de 8 hasta 51 tallos comerciales por parcela y un valor promedio de 29. Esta información describe la heterogeneidad de la población y hace evidente que la población no ha sido intervenida con propósitos comerciales en varios años. El porcentaje de individuos por estado de madurez refuerza esta observación (Gráfico 19): hay un elevado número de tallos adultos (57% de tallos maduros y sobremaduros) y secos (15%), y un reducido número de renuevos (2%). En otras palabras, los tallos adultos y secos no se han cosechado. Esa situación conduce a un proceso de senescencia del bosque y, para modificarlo, se deben extraer los tallos secos y un porcentaje (entre el 30 y el 50%) de los adultos. Con esta práctica, se activa el crecimiento poblacional y aumenta la población en un 30% (Moreno, 2006b).

Respecto al diámetro de los tallos, se observó que hay una amplia variación al interior de cada parcela (Gráfico 13 y Gráfico 14). En las áreas de mayor densidad, el diámetro de los tallos fue menor y, en los sectores de menor densidad, el tamaño de los tallos fue mayor (Gráfico 17). La situación descrita es un comportamiento lógico si se admite que a mayor número de individuos por unidad de área, mayor es la competencia por recursos y, por ende, el diámetro de los tallos es menor. Se espera que con la extracción de tallos adultos y secos aumente el crecimiento de renuevos y aumente la densidad total de tallos. Con el aumento en la densidad de tallos se espera, así mismo, que el diámetro promedio se reduzca y que se disminuya la variación en los datos.

5.3.4 Propuesta de manejo específica

La propuesta de manejo específico por sitio debe orientar al productor en la identificación de áreas de mayor y de menor productividad para que, con esta información, se puedan definir intensidades de cosecha: mayores en áreas de mayor productividad y menores en áreas de menor productividad (y/o fragilidad

ambiental). Adicionalmente, el proponer un manejo específico por sitio debe permitir la identificación de calidades de material, de acuerdo a las necesidades de los clientes.

Con base en estos principios, se realizó el análisis estructural de los datos (gráfica de semivariograma) y, seguidamente, se emplearon herramientas de interpolación adecuadas para predecir las variables de interés. Las variables analizadas fueron densidad de tallos comerciales y diámetro (DAP).

La gráfica de semivarianza para la variable tallos comerciales (ver Gráfico 12) tuvo como resultado una línea recta que, en términos del análisis estructural, es definida como ruido blanco (o pepita puro) y expresa la no autocorrelación espacial de la variable. Es decir, la densidad de tallos comerciales no se puede analizar independientemente como una variable regionalizada, es una variable aleatoria y, por lo tanto, para su interpolación se debe emplear una técnica determinística que prediga la probabilidad de ocurrencia de los valores sin establecer correlación con los sitios de muestreo. Ramírez (2005) comparó varios métodos de interpolación aplicados en actividades forestales y destacó, entre los métodos determinísticos, el método de función en base radial como el más confiable.

Con los resultados del semivariograma y la información del tipo de método recomendado, se empleó la interpolación determinística radial tipo Spline para predecir la densidad de tallos comerciales (Mapa 5). Se observa que el error de estimación, definido como Root-Mean-Square (ver anexo 1), es de 10,48%. Los valores estimados se alejan de los valores observados (valores extremos: mínimo 8, máximo 51) y son cercanos al valor promedio (29). En términos generales, el mapa sugiere una menor densidad para el gradual donde se ubicaron las fajas 34 y 43, y una mayor densidad de tallos comerciales en el rodal donde se ubicaron las fajas 13 y 17.

Una diferencia importante que se presenta entre el presente estudio y otros llevados a cabo en agricultura específica, o en manejo forestal específico, es el diseño de muestreo empleado. En un trabajo realizado para medir la productividad de banano en Costa Rica, Bolívar y colaboradores (Bolívar, Dominguez, Arroyo, Perret, & Soto, 2013) realizaron un muestreo sistemático en los cables de recolección de fruta cada 50 m, cubriendo la totalidad la plantación. En los ejemplos descritos por Giraldo (2002), relacionados con el análisis de salinidad en la Ciénaga Grande de Santamarta, emplearon un muestreo sistemático de cuadrículas (cada una de 4 km²) para generar los semivariogramas y las gráficas de interpolación. En manejo forestal, también se observó la aplicación de métodos de interpolación (Menéndez, 2012; Miranda-Salas & Condal, 2003) a partir de datos muestreados sistemáticamente; en el trabajo de Miranda-Salas y Condal, el muestreo se realizó sistemáticamente cada 100 m sobre las curvas de nivel, hasta completar 816 muestras; en Menéndez, se compararon dos áreas de estudio; en una de las áreas se ubicó una parcela por kilómetro cuadrado (muestreo sistemático), y en la otra zona se dispuso una malla de 150 m, donde se revisaron 206 parcelas.

La distribución del muestreo aleatorio por conglomerados (que así como su nombre lo indica, no está distribuido en la totalidad del área), el número de las muestras y la presencia de valores extremos tan alejados, pueden explicar por qué los valores estimados se alejan de los valores observados y, por qué el error de estimación se aleje del valor ideal (cero).

Dado que la variable densidad de tallos arrojó un semivariograma con ruido blanco, entonces, una alternativa es analizar esta variable junto con otras que sí se comporten de manera regionalizada, y por ende, emplear métodos de interpolación tipo cokriging. Se debe tener en cuenta que un muestreo sistemático permitiría ajustar la propuesta de aprovechamiento específico por lotes con un menor error.

Ahora bien, los costos del muestreo sistemático son mayores al MAC. Por ello, es importante considerar los costos de la aplicación del muestreo sistemático para la generación de propuestas de manejo específico por lote, y compararlo contra los costos de aumentar la intensidad de muestreo del MAC para generar mayor cobertura del área de estudio. Este análisis brindará los argumentos para decidir si es rentable aumentar el costo del muestreo (muestreo sistemático) para lograr una propuesta específica por sitio con menor margen de error, o por el contrario, continuar empleando el MAC y, paulatinamente, ajustar el modelo hasta reducir el error.

De cualquier manera, es fundamental generar mapas de productividad del guadua, y la productividad está determinada por el número de tallos cosechados, lo que a su vez se obtiene a partir de conocer la densidad de tallos comerciales.

La recomendación inicial es aplicar la misma intensidad de cosecha a los dos rodales (lo que se realiza en el manejo tradicional) y evaluar nuevamente el modelo a los 18-24 meses, antes de efectuar el siguiente aprovechamiento. En ese momento, se determinará si es necesario, o no, cambiar el tipo de muestreo.

Lo que se espera para el siguiente aprovechamiento es que la población los valores extremos disminuyan (reduzca la varianza) y aumente la densidad poblacional promedio, en consecuencia, el mapa resultante deberá tener menores diferencias entre los valores estimados (de predicción) y los valores observados en las parcelas.

Determinar la propuesta de manejo específico para el aprovechamiento de guadua, a partir del mapa de interpolación de la densidad de tallos comerciales, en este momento, es prematuro.

Con relación a los datos de DAP, el semivariograma (Gráfico 16) sugiere que la variable presenta autocorrelación espacial y que la distancia de muestreo es cada

100 m, dado que es a esta distancia cuando el modelo (línea azul) alcanza el umbral. Generó duda la heterogeneidad de los valores de semivarianza (puntos rojos por encima de la curva del modelo), por lo que esta variable también se trabajó como no regionalizada y se prefirió aplicar también una herramienta de interpolación determinística.

El mapa obtenido (Mapa 6) señala que el diámetro del rodal superior derecho es consistente con los datos de densidad de tallos comerciales; es decir, a una menor densidad de tallos comerciales, se presentan mayores diámetros (14-16 cm), y en el rodal inferior izquierdo, los diámetros de los tallos son menores (13-14,3 cm principalmente), siendo consistente con la mayor densidad de tallos comerciales.

En resumen, se logra hacer una exploración muy detallada de la población con las herramientas que ofrece el sistema de información geográfica y se logra entender los procesos que están ocurriendo. Sin embargo, una propuesta de manejo específica no puede ser definitiva puesto se requiere que inicien las actividades de aprovechamiento e ir documentando los cambios que ocurren en el guadua y, de esta manera, ir afirmando o reconsiderando las propuestas que acá se esbozan.

5.4 Basado en un análisis de costo-beneficio, ¿Cuál sería la mejor tecnología de marcación para la trazabilidad de los rodales de guadua?

La mejor tecnología de marcación debe permanecer en el tallo durante todos los procesos del eslabón de producción primaria, desde que emerge el renuevo hasta que es cosechado y es transportado hasta su destino (centros de procesamiento o cliente). Debe además considerarse que en el proceso de patio de corte (donde se seccionan los tallos), cada tallo se multiplica por el número de piezas que

genere, el cual puede variar dependiendo el uso, entre 4 y 5 cuando solo es para construcción, o de 20 a 40 cuando se obtienen latas para elaborar laminados.

El análisis costo-beneficio calificó la marcación con pintura, la pintura con microtaggants y los códigos de barra, como las tres tecnologías de marcación que mejor responden a las necesidades del sector de la guadua.

En términos de costo, la marcación con pintura es lo más básico, lo menos costoso y lo más efectivo, porque no exige de una tecnología acompañante sofisticada (puede emplear planillas y sistematizar la información en hojas electrónicas), y la capacitación a los operarios es sencilla. Requiere que sean identificados los renuevos en campo, contados y registrados en una planilla, para conocer el número de renuevos anuales. El beneficio directo es que, al momento del corte, se conoce la cantidad de material disponible y la edad de los tallos que pueden ser extraídos por lote. Rodríguez y colaboradores (2011) presentaron una propuesta de colores por semestre que puede ser empleada, la cual facilita el reconocimiento de los tallos a distancia.

La segunda tecnología, la marcación con pintura de nanopartículas (o microtaggants), es un salto tecnológico importante. La ciencia de las nanopartículas es un campo extenso y puede ofrecer soluciones simples y económicas como nanopartículas que solamente se diferencian de la pintura normal por la presencia de microplaquetas que se visualizan con luz ultravioleta, como también puede haber nanopartículas con chips que registran información electrónica que se traslada de forma inalámbrica a un equipo de mano. La marcación con nanopartículas recibió este nivel de importancia precisamente porque puede empezar a emplearse con adelantos sencillos que brinden más seguridad al tema de la trazabilidad que la simple pintura. Representa costos iniciales altos, en la medida en que las nanopartículas que se empleen deberán elaborarse en un lugar especializado, pero la información consultada (Dykstra et al., 2002) señala que el costo es competitivo y se compara con los costos de

implementación del código de barra. En principio, la operación de esta tecnología representa el mismo esfuerzo de capacitación y la misma tecnología acompañante que la marcación con pintura.

La tercera tecnología es códigos de barra o códigos QR. Esta marcación exige que se impriman los códigos en un material resistente a la intemperie. Adicionalmente, se debe planificar el suministro con anticipación y calcular con mayor precisión el número de piezas (stickers y/o placas) que se van a generar, para programar su impresión. Representa un costo elevado en la generación de placas por lo que debe ser muy exigente en el cálculo de volúmenes para la planificación y control de etiquetas. La tecnología acompañante del código de barras o códigos QR puede variar: empleo de dispositivos electrónicos especializados para la lectura con infrarrojos hasta teléfonos celulares con aplicaciones capaces de hacer lectura de los impresos y que envíen códigos vía celular, wifi o bluetooth. Se requiere una base de datos (un software) que reciba (administre) la información proveniente de los dispositivos de captura. Los costos de capacitación podrán ser moderados dada la universalidad de la aplicación de los códigos de barra y debido a que el proceso se centra en capacitar en la lectura y descarga de datos.

En síntesis, el presente trabajo es un vistazo general a las principales tecnologías de marcación y aborda un análisis muy básico para entender las implicaciones de la implementación de este tipo de tecnologías en el sistema productivo de la guadua.

En cualquiera de los casos, es fundamental que se fortalezca la cultura de la marcación y que el propietario se comprometa con la organización y la administración del rodal de guadua. Las soluciones tecnológicas se podrán ir implementando (y evolucionando) de acuerdo a las oportunidades de inversión o de consecución de recursos, pero es necesario que la tecnología se adapte a las necesidades y capacidades del cliente (propietarios, operarios de guadua,

administradores del corte, entre otros) quien es finalmente el que opera y alimenta la herramienta. La cultura de marcación mejora los estándares de calidad del material y, por ende, mejora los réditos del guadua para todos los actores del sector.

5.5 Consideraciones finales: ¿es posible reproducir esta metodología en otras fincas? y ¿qué recursos son necesarios para su implantación?

La metodología de manejo específico por sitio para el aprovechamiento de *Guadua angustifolia* se basó, por un parte, en el uso de herramientas geoestadísticas (estadística descriptiva, semivariogramas y el uso interpoladores) para el análisis de los datos de DAP y tallos comerciales por parcela, para proponer un manejo diferenciado del corte y, por otra parte, en la comparación de la información del sitio y del diámetro promedio de los tallos, con la información sobre grupos geográficos de calidad de guadua identificados para la región Eje Cafetero Colombiano (García & Camargo, 2011; García, 2004), para determinar el mercado objetivo (construcción, laminados o artesanías) del material que se produce en finca.

En este contexto, es factible replicar la identificación del mercado potencial de la guadua por finca a partir de los datos de muestreo, puesto que esta información se obtiene principalmente con el análisis de la estadística descriptiva de DAP, la altura del sitio, la temperatura promedio y las condiciones del terreno (pendiente y cercanía a fuentes hídricas).

Formular una propuesta de manejo específico para la hacienda Maravélez es todavía prematuro, principalmente porque el guadua no ha sido aprovechado comercialmente en varios años (ver numeral 5.3.4). Considero que es viable el empleo de las herramientas de geoestadística para analizar la densidad de tallos comerciales para determinar áreas de mayor (y menor) concentración de tallos y,

por lo tanto, se podrán definir lotes con diferencias en la intensidad de cosecha; sin embargo, es un proceso que deberá ajustarse constantemente hasta el momento en que la población de guadua, bajo la acción periódica del aprovechamiento sostenible, se estabilice, lo cual está calculado para unos 7 a 8 años (Morales, 2007).

En síntesis, ajustar la propuesta de manejo específico para el aprovechamiento de guadua, empleando herramientas geoestadísticas, exige un muestreo periódico (18-24 meses, previo a las actividades de cosecha), para ir actualizando los datos de densidad de tallos comerciales y valores de DAP y, generar mapas de productividad que, adicionalmente, indiquen la calidad del material. Así mismo, es necesario incorporar otras variables que permitan afinar la propuesta, tanto a nivel de manejo (intensidades y/o frecuencias de cosecha por lote, empleo de fertilizantes, otros), como del medio (nivel de nutrientes en el suelo que incidan en la productividad y en la calidad de la guadua), y que permitan el empleo de otras herramientas de geoestadística como el análisis de covarianza y cokriging.

En cuanto a talento humano, para diseñar la propuesta de aprovechamiento específico por sitio se requiere un profesional especialista en el uso de sistemas de información geográfico con habilidad para la interpretación de herramientas geoestadísticas de interpolación y semivariogramas, así como un profesional con experiencia en manejo forestal de guadua. En cuanto a recursos, se requiere un equipo de GPS (navegador con error de +/-3 m o menos) y un software SIG con herramientas en geoestadística (ArcGIS, Quantum, GVSig, otros) para administrar y analizar la información de las unidades productivas. En caso de no tener el paquete de geoestadística incorporado en el software, es factible obtener este análisis con otros programas (vg. Software R).

La marcación de los tallos es un control que debe incorporarse en los procesos de la finca. El grado de tecnificación del método de marcación evolucionará en función del beneficio económico que se derive del aprovechamiento; el principal

interés en este punto del trabajo es hacer énfasis en la necesidad de la marcación de los tallos para controlar la calidad del material, puesto que las soluciones tecnológicas para el control de inventarios y trazabilidad de la calidad de los procesos existen en varios sectores y podrán adaptarse a las condiciones y la capacidad económica en cada finca.

6 Conclusiones

La hacienda Maravález, ubicada en el municipio de La Tebaida, departamento del Quindío, Colombia, tiene un área de 13,22 ha en guaduales, de los cuales 5,22 ha son de carácter productivo y 8,0 ha se encuentran en pendientes mayores a 40°, por lo que fueron considerados como no productivos. El área de estudio se concentró en las dos matas de guadua de mayor tamaño que suman 4,7 ha y fueron definidas como el marco de muestreo. En dicha área se definieron 45 fajas de 10 m de ancho.

El esfuerzo de muestreo calculado para esta área fue de 4 fajas (95% de confianza). Se empleó el muestreo aleatorio por conglomerados (bi-etápico), lo cual significa que se aleatorizó la selección de las fajas y, al interior de cada faja, se aleatorizó la selección de las parcelas. El diseño del muestreo se observa en el Mapa 4.

El procesamiento de los datos, empleando la estadística sugerida en la norma unificada para muestreos aleatorios por conglomerados, indicó que el guadual estudiado tiene una densidad de 6.156 tallos por hectárea, lo que corresponde 29.120 tallos totales (límite inferior de 27.568,5 y límite superior de 30.672,3), con un error de 5,33%. De esta población, el 2% son renuevos, 25% verdes, 18% maduras, 39% sobremaduras, 15% secas y 1% matabambas (guaduas con diámetros menores a 5 cm). Estas cifras describen a una población principalmente senescente (57% adultos + 15% secos), con muy bajo porcentaje de entradas (renuevos), común en guaduales que no ha sido intervenidos para aprovechamiento comercial, como ocurre en el presente guadual.

Los objetivos del trabajo se orientaron al empleo del SIG para realizar una propuesta de aprovechamiento específico por sitio, desde la identificación y caracterización de los rodales, hasta el empleo de herramientas geoestadísticas que permitieran determinar la calidad y la cantidad de materia disponible por lote.

El último objetivo estuvo relacionado con el análisis costo-beneficio de dispositivos para la marcación de los tallos de guadua.

Para los dos primeros objetivos, se emplearon imágenes de satélite y otras capas disponibles en SIG Quindío para la caracterización y zonificación de los guaduales. El empleo de imágenes satelitales es una ayuda muy importante para la localización de los guaduales. Es eficaz y sirve de orientación para el trabajo de campo. La recomendación de Kleinn y Morales (2006) de reducir el área de la imagen en una distancia de 8,6 m, para eliminar la proyección que genera la inclinación de las ramas es útil como valor de referencia, pero es fundamental el empleo del GPS para obtener medidas precisas en cada sitio de muestreo.

Las capas disponibles en SIG Quindío (suelos, pendiente, curvas de nivel), como apoyo para el cálculo de la pendiente y la caracterización de los guaduales, están a una escala menor de la requerida en los planes de manejo. La escala disponible en SIG Quindío es de 1:10.000 y los planes de manejo deben ser presentados a escala 1:1000, por lo tanto no fue posible emplear estas capas para automatizar el proceso de caracterización de áreas.

Las variables empleadas para el análisis geoestadístico fueron *densidad de tallos comerciales* y *diámetro a la altura del pecho* en la mitad del entrenudo (DAP). Dicho análisis comprendió, análisis exploratorio de las variables, análisis de semivarianza (semivariograma experimental) e interpolación de los datos.

Los resultados obtenidos para la variable *densidad de tallos comerciales* indican que los datos presentan una distribución normal, concentrados alrededor de la media (leptocurtosis), el mayor número de observaciones se presentó entre 25,2 y 33,8 tallos, el valor promedio es 29 con una desviación estándar ($\pm 10,16$). Los valores extremos son muy marcados, entre el mínimo valor (8) y el máximo (51).

En el análisis de semivarianza para *densidad de tallos comerciales* se obtuvo una línea recta, que en términos del análisis estructural es definida como ruido blanco (o pepita puro) y expresa la no autocorrelación espacial de la variable. Es decir, la densidad de tallos comerciales no se puede analizar independientemente como una variable regionalizada, es una variable aleatoria y, por lo tanto, para su interpolación se debe emplear una técnica determinística que prediga la probabilidad de ocurrencia de los valores sin establecer correlación con los sitios de muestreo. La recomendación en este caso es realizar un análisis de covarianza que permita integrar la variable densidad de tallos (la cual es no regionalizada) con una (o más) variable(s) que presente(n) autocorrelación espacial y facilite su interpretación.

El mapa de interpolación obtenido para la variable *densidad de tallos comerciales*, empleando la técnica determinística de interpolación radial tipo Spline, presentó menor densidad de tallos comerciales donde se ubicaron las fajas 34 y 43, y mayor densidad en el rodal donde se ubicaron las fajas 13 y 17, lo cual sugiere diferenciar las intensidades de cosecha para estas dos matas de guadua. Sin embargo, los valores de densidad de tallos comerciales son mucho menores a los observados y, por lo tanto, determinar la intensidad de cosecha a partir de esta información es impreciso.

La recomendación que se deriva de este punto es aplicar la misma intensidad de cosecha a los dos rodales (de la manera tradicional) y evaluar nuevamente el mismo modelo a los 18-24 meses, antes de efectuar el siguiente aprovechamiento. Se puede considerar modificar el muestreo asumiendo el aumento de costos que esto representa, o como se mencionó anteriormente, realizar un análisis de covarianza que permita la búsqueda de otros modelos con el mismo esfuerzo de muestreo.

Con relación a los datos de DAP, el semivariograma (Gráfico 16) sugiere que la variable presenta autocorrelación espacial pero se trabajó como variable no

regionalizada para aplicar la misma técnica de interpolación (Spline). Es importante señalar que los valores de diámetro de los tallos son muy heterogéneos, por las condiciones de no aprovechamiento que presenta el guadual, y que el manejo puede conducir a una reducción de la variabilidad que ahora se presenta.

El mapa obtenido (Mapa 6) señala que el diámetro de los tallos en el rodal, ubicado en el mapa en la parte superior derecha, es mayor (14-16 cm), lo que es consistente con los datos de densidad de tallos comerciales (menor densidad de tallos comerciales, mayores diámetros), y en el rodal inferior izquierdo, los diámetros de los tallos son menores (13-14,3 cm), siendo consistente con la mayor densidad de tallos comerciales.

La guadua que produce la finca Maravélez tiene un mercado principalmente orientado a laminados y artesanía. Esta conclusión se deriva de comparar los grupos geográficos de calidad de guadua descritos en la literatura ([García & Camargo, 2011](#)) con la información de altitud y DAP promedio del presente estudio.

Se espera que aumente en un 30% la densidad de tallos comerciales luego del proceso de aprovechamiento, por cuanto se permite retirar todos los tallos secos y hasta el 50% de los tallos comerciales, activando el crecimiento de renuevos.

La hipótesis “el empleo del SIG permite definir áreas de protección y de producción, cantidades y calidades de los culmos de guadua disponibles por lote, de tal forma que es posible proponer un diseño de manejo específico por sitio” se respondió en buena medida: se definieron áreas de protección, se realizó un primer ensayo para determinar las cantidades y las calidades disponibles por lote, pero es necesario llegar a un nivel de precisión mayor que se logra con el seguimiento y la documentación de las actividades de aprovechamiento del guadual en el tiempo. Por lo tanto, el proponer un aprovechamiento específico por

sitio para guadua requiere de ajustes y comparaciones en otras locaciones y en otras condiciones de terreno para validar de forma más robusta esta propuesta.

Sin embargo, es satisfactorio reconocer que el SIG fue útil para la georreferenciación del guadua, facilitó el diseño del muestreo y, con el empleo de la herramienta *sampling design* se puede reducir el sesgo de muestreo, de hecho, puede ser una herramienta para autoridades e ingenieros que realizan inventarios forestales, en tanto que automatiza el proceso de aleatorización de las unidades de muestreo.

Proponer un manejo específico por sitio exige un análisis geoestadístico detallado. La aplicación de semivariogramas es un ejercicio iterativo para conseguir un ajuste adecuado. Así mismo, la correcta aplicación de gráficos de interpolación demanda de un minucioso estudio de variables y parámetros para ajustar el modelo predictivo.

De acuerdo a lo analizado, las predicciones más certeras se obtienen con las herramientas de interpolación de cokriging; para ello es necesario mezclar variables independientes, como la densidad de tallos, y variables con dependencia espacial (regionalizadas), como DAP.

La propuesta de manejo específico para guadua es una solución que puede traer consecuencias positivas para el sector en términos económicos y en términos ambientales, porque supone un manejo contable más riguroso del proceso del aprovechamiento y supone una administración basada en el conocimiento detallado de los rodales, reduciendo intensidades de cosecha en áreas de menor productividad y aumentándolas en áreas de mayor productividad.

El último objetivo se orientó a dar vistazo a las principales tecnologías de marcación y aborda un análisis muy básico para entender las implicaciones de la implementación de este tipo de tecnologías en el sistema productivo de la

guadua. El análisis costo-beneficio calificó la marcación con pintura, la pintura con microtaggants y los códigos de barra, como las tres tecnologías de marcación que mejor responden a las necesidades del sector de la guadua. En cualquiera de los casos, es fundamental que se fortalezca la cultura de la marcación y que el propietario se comprometa con la organización y la administración del rodal de guadua. Las soluciones tecnológicas se podrán ir implementando (y evolucionando) de acuerdo a las oportunidades de inversión o de consecución de recursos, pero es necesario que la tecnología se adapte a las necesidades y capacidades del cliente (propietarios, operarios de guadua, administradores del corte, entre otros) quien es finalmente el que opera y alimenta la herramienta. La cultura de marcación mejora los estándares de calidad del material y, por ende, mejora los réditos del gradual para todos los actores del sector.

7 Referencias

- Adamchuk, V. ., Hummel, J. ., Morgan, M. ., & Upadhyaya, S. . (2004). On-the-go soil sensors for precision agriculture. *Computers and Electronics in Agriculture*, *44*(1), 71–91. doi:10.1016/j.compag.2004.03.002
- Arango, A. M. (2011). *Posibilidades de la guadua para la mitigación del cambio climático: Caso: Eje Cafetero Colombiano*. Tesis Pregrado - Universidad Tecnológica de Pereira, Pereira, Colombia. Retrieved from <http://repositorio.utp.edu.co/xml/handle/11059/2278>
- Arango, E., Mutis, S., Manzur, D., & Vélez, S. (1989). *Bambusa guadua*. Bogotá: Villegas Editores.
- Arbeláez-Cortés, E., Marín-Gómez, O. H., Duque-Montoya, D., Cardona-Camacho, P. J., Renjifo, L. M., & Gómez, H. F. (2011). Birds , Quindío Department , Central Andes of Colombia. *Check List*, *7*(3), 227–247.
- Arias, L. M., Camargo, J. C., & Cardona, H. (2008). Carbono orgánico edáfico en rodales de *Guadua angustifolia* Kunth, Poaceae y en pasturas arborizadas en la zona cafetera de Colombia. In E. Murgueitio, C. A. Cuartas, & J. F. Naranjo (Eds.), *Ganadería del futuro: Investigación para el desarrollo* (pp. 246–261). Cali: Fundación CIPAV. Retrieved from http://corpomail.corpoica.org.co/BACFILES/BACDIGITAL/56722/s2d1E73FC2532AE B4A1162C0C14F3DF9E8F_1.pdf
- Asamblea departamental del Quindío. Ordenanza 011 de 2010: Incentivos a la conservación por pago de servicios ambientales hídricos en cuencas abastecedoras de importancia estratégica (2010). Colombia.
- Bernal, L. E. (2002). Estudio para definir criterios técnicos y metodológicos para el inventario, ordenamiento, zonificación y manejo sostenible del recurso guadua en el eje cafetero, Tolima y Valle del Cauca. Proyecto de manejo sostenible de bosques en Colombia MSBC. Pereira, Colombia: Corpocaldas. CRQ. CARDER. Cortolima. CVC. Minambiente. GTZ.
- Björk, A., Erlandsson, M., Häkli, J., Jaakkola, K., Nilsson, Å., Nummila, K., ... Sirkka, A. (2011). Monitoring environmental performance of the forestry supply chain using RFID. *Computers in Industry*, *62*(8-9), 830–841. doi:10.1016/j.compind.2011.08.001
- Blackmore, S. (2007). Agricultura de Precisión. *Revista Nacional de Agricultura*, (949), 20–28.
- Bolívar, K., Dominguez, J. A., Arroyo, A. T., Perret, J., & Soto, M. (2013). Análisis geo-referenciado de la distribución del número de manos por racimo en un área bananera. *Agronomía Costarricense*, *37*(2), 105–113. Retrieved from http://www.mag.go.cr/rev_agr/v37n02_105.pdf

- Buja, K., & Menza, C. (2013). *Sampling Design Tool for ArcGIS - Instruction Manual*. Silver Spring, MD: NOAA/NOS/NCVOS/CCMA Biogeography Branch.
- Burger, J. (2009). Management effects on growth, production and sustainability of managed forest ecosystems: Past trends and future directions. *Forest Ecology and Management*, 258(10), 2335–2346. doi:10.1016/j.foreco.2009.03.015
- Calle, Z., Henao-Gallego, N., Giraldo, C., & Armbrecht, I. (2013). A Comparison of Vegetation and Ground-Dwelling Ants in Abandoned and Restored Gullies and Landslide Surfaces in the Western Colombian Andes. *Restoration Ecology*, 1–8. doi:10.1111/rec.12001
- Calle, Z., & Méndez, L. (2009). Estructura y Composición de la Vegetación Arbórea en el Agropaisaje del Río La Vieja. In J. M. Rodríguez, J. C. Camargo García, A. M. Pineda, L. M. Arias Giraldo, M. Echeverry, & C. Miranda (Eds.), *Valoración de la Biodiversidad en la Ecorregión del Eje Cafetero* (pp. 171–182). Pereira: CIEBREG.
- Camargo, J. C., Chará, J., Giraldo, L. P., Chará-Serna, A. M., & Pedraza, G. X. (2011). Beneficios de los corredores ribereños de *Guadua angustifolia* en la protección de ambientes acuáticos en la ecorregión cafetera de Colombia. 1. Efectos sobre las propiedades del suelo. *Recursos Naturales Y Ambiente*, (61), 53–59. Retrieved from http://web.catie.ac.cr/informacion/RFCA/rev61/rna61_p53.pdf
- Camargo, J. C., Dossman, M. A., Cardona, G., García, J. H., & Arias, L. M. (2007). *Zonificación detallada del recurso guadua en el Eje Cafetero, Tolima y Valle del Cauca. Municipios piloto del proyecto Manejo Sostenible de Bosque en Colombia (Guía metodológica y resultados)* (pp. 1–143). Pereira, Colombia: UTP. CARDER. CRQ. CORTOLIMA.CVC.
- Camargo, J. C., Dossman, M. A., Rodríguez, J. A., & Arias, L. M. (2011). Integrated management of Bamboo Resources in the Colombia Coffee Region. In *VIII World Bamboo Congress* (Vol. 4, pp. 34–56). WBC VIII. Retrieved from http://bambusc.org.br/wp-content/gallery/WBC2009/WBCVIII-Vol_04.pdf
- Camargo, J. C., Morales, T., & García, J. H. (2007). *Mensura e inventario forestal para la planificación y manejo sostenible de bosques de guadua* (pp. 1–125). Pereira: Colciencias. UTP-GATA.
- Camargo, J. C., Morales, T., & García, J. H. (2008). Términos de referencia para la formulación de planes de manejo y aprovechamiento sostenible de guaduales. Pereira, Colombia: Proyecto Bosques FLEGT/Colombia. Universidad Tecnológica de Pereira.
- Camargo, J. C., Morales, T., & Ospina, R. (2002). Ajustes metodológicos para la investigación en silvicultura, biodiversidad vegetal y estructura de los bosques de guadua. In *Seminario - Taller Avances en la investigación sobre guadua* (pp. 1–10). Pereira, Colombia: Universidad Tecnológica de Pereira. Retrieved from http://www.sigguadua.gov.co/sites/default/files/archivos/Juan_Carlos_Camargo.PDF

- Camargo, J. C., & Rodríguez, J. A. (2011). La importancia de la definición de la madurez de culmos de guadua. In O. Marino, E. Henao, H. Quintero, J. A. Rodríguez, J. D. Suárez, & J. C. Camargo (Eds.), *Desarrollo tecnológico para optimizar la calidad de los productos obtenidos de bosques de guadua: definiendo la madurez de los culmos y mejorando los procesos de organización* (pp. 15–25). Pereira: Universidad Tecnológica de Pereira. Colciencias.
- Cardesa, F., Costa, C., Higgins, M. Lou, Arias, A., Franco, C. A., Bonilla, C. S., & Lizcano, L. (2010). *Pacto intersectorial por la madera legal en Colombia*. (X. Sanclemente & R. D. Moreno, Eds.) (pp. 1–32). Dosquebradas, Colombia: Ministerio de Ambiente y Desarrollo Territorial. Proyecto Bosques FLEGT / Colombia (Unión Europea - CARDER). WWF. Fedemaderas.
- Caro, J., & Mejía, N. (2013). Revisión bibliográfica de la cadena productiva de la guadua en Colombia (2002-2012). In N. Mejía & R. D. Moreno (Eds.), *Estado del arte de la cadena de la guadua en Colombia 2003-2012* (pp. 1–62). Armenia: CARDER. MinAmbiente.
- Castaño, F. (2002). Estudio de la calidad de sitio y su incidencia en el crecimiento y desarrollo de las plantaciones de guadua (Análisis de caso: Valle del Cauca). Armenia, Colombia: Memorias curso Manejo de Guadales Plantados. MSBC.GTZ.CAR. Retrieved from <http://www.sigguadua.gov.co/sites/default/files/archivos/CARDER - El sitio y su incidencia en la guadua.pdf>
- Castaño, F., & Moreno, R. D. (2004). *Guadua para todos. Cultivo y aprovechamiento* (pp. 1–190). Bogotá, Colombia: CARDER. Proyecto Manejo Sostenible de Bosques en Colombia. Programa Ambiental GTZ.
- Chará, J., Giraldo, L. P., Chará-Serna, A. M., Zúñiga, M. del C., Pedraza, G. X., & Camargo, J. C. (2011). Servicios ambientales hidrológicos de los corredores ribereños de guadua (*Guadua angustifolia* , Kunth) en paisajes agropecuarios del Quindío. In *2° Congreso Internacional de Guadua y otros bambúes 2011 y 2a feria de fibras naturales*. Armenia, Colombia: CRQ.
- Clark, I. (1979). Background information about practical geostatistics. *Practical Geostatistics*. Retrieved June 15, 2014, from http://www.kriging.com/PG1979/index.htm#Chapter_2+Part1
- Cock, J. H., & Jiménez, D. (2011). La agricultura específica por sitio: definición e importancia. In Tecnicaña (Ed.), *Seminario de agricultura específica por sitio y agricultura de precisión* (pp. 72–83). Cali: Asociación de técnicos de la caña de azúcar de Colombia (Tecnicaña).
- Colombia - Departamento Nacional de Planeación. (2013). Documento Conpes 3743. Distribución de recursos para el certificado de incentivo forestal con fines comerciales (CIF de reforestación) vigencia 2013. Bogotá, Colombia: MADR. MADS. DNP.

- Colombia - Ministerio de Agricultura y Desarrollo Rural. (2005). La cadena de la guadua en Colombia. Una mirada global de su estructura y dinámica. 1991-2005. Documento de trabajo No . 65. Bogotá, Colombia: Ministerio de Agricultura y Desarrollo Rural.
- Corporación, CRQ, CARDER, CorTolima, & CVC. (2008). Norma Unificada para el Manejo y Aprovechamiento de la Guadua. Pereira, Colombia: CARDER.
- CRQ. (1997). Proyecto de caracterización de relictos de bosque en el municipio de Armenia. Armenia: CRQ. Alcaldía de Armenia. Red de Reservas Naturales.
- CRQ. (2001). Inventario preliminar de los recursos naturales del departamento del Quindío. Armenia: CRQ. Fudesco.
- CRQ, Gobernación del Quindío, & IGAC. (2012). SIG Quindio. *Visor General*. CRQ. Gobernación del Quindío. IGAC. Retrieved from <http://200.21.93.53/sigquindioii/VisorGeneral.aspx>
- CSIL. (2010). Estudio de mercado en Europa para la comercialización de productos transformados del bambú (*Guadua angustifolia* Kunth). Proyecto "Promoción, innovación y desarrollo industrial de la guadua" ATN/ME-10697-CO. Milan, Italia: Centre for Industrial Studies.
- Cunha, C. R., Peres, E., Morais, R., Oliveira, A. a., Matos, S. G., Fernandes, M. a., ... Reis, M. J. C. S. (2010). The use of mobile devices with multi-tag technologies for an overall contextualized vineyard management. *Computers and Electronics in Agriculture*, 73(2), 154–164. doi:10.1016/j.compag.2010.05.007
- De Flander, K. (2005). *The role of bamboo in global modernity: from traditional to innovative construction material. Barriers and Opportunities to Greater Development and use of Guadua-Bamboo for Construction Products*. Master Thesis - Wageningen University, The Netherlands.
- Dossman, M. A., Arias, L. M., & Camargo, J. C. (2011). Identificación y valoración de los servicios ecológicos prestados por los suelos bajo distintas coberturas en la cuenca del río La Vieja, Colombia. *Recursos Naturales Y Ambiente*, (58), 17–24.
- Dykstra, D., Kuru, G., Taylor, R., Nussbaum, R., Magrath, W., & Story, J. (2002). Technologies for Wood Tracking. Verifying and monitoring the chain of custody and legal compliance in the timber industry. Cambodia: World Bank.WWF Alliance.
- Erazo, E. (2011). Agricultura de precisión en Cenicaña. In *Seminario de agricultura específica por sitio y agricultura de precisión* (pp. 186–199). Cali: Asociación de técnicos de la caña de azúcar de Colombia (Tecnicaña).
- Fajardo, D., Johnston-González, R., Neira, L., Chará, J., & Murgueitio, E. (2009). Influencia de sistemas silvopastoriles en la diversidad de aves en la cuenca del río La Vieja, Colombia. *Recursos Naturales Y Ambiente*, (58), 9–16.

- Farbiarz, J. (2002). Behaviour of bamboo bahareque walls and assemblies. In L. Yiping (Ed.), *Proceedings of the International Workshop on the Role of Bamboo in Disaster Avoidance* (pp. 98–104). Guayaquil, Ecuador: INBAR.
- Fedeguadua. (2007). Feasibility analysis of the Centre for Primary Processing in the Department of Quindío (Colombia). Final Report. Inbar Contract 06-1096. Armenia: FEDEGUADUA. INBAR.
- Federación Nacional de Cafeteros de Colombia. (2011). Incorporación de la biodiversidad en el sector cafetero en Colombia. In *2° Congreso Internacional de Guadua y otros bambúes 2011 y 2a feria de fibras naturales*. Armenia, Colombia: CRQ.
- Fortin, M.-J., James, P. M. a., MacKenzie, A., Melles, S. J., & Rayfield, B. (2012). Spatial statistics, spatial regression, and graph theory in ecology. *Spatial Statistics*, *1*, 100–109. doi:10.1016/j.spasta.2012.02.004
- García, J. H. (2004). *Definición de áreas óptimas de calidad de guadua (Guadua angustifolia Kunth), orientada a satisfacer las necesidades del mercado*. Tesis Maestría - Universidad Tecnológica de Pereira, Pereira, Colombia. Retrieved from <http://jorgehugo.comunidadcoomeva.com/blog/uploads/DefiniciondeAreasOptimasGuadua.pdf>
- García, J. H., & Camargo, J. C. (2011). Condiciones de calidad de Guadua angustifolia para satisfacer las necesidades del mercado en el Eje Cafetero de Colombia. *Recursos Naturales Y Ambiente*, (61), 67–76.
- Giraldo, E., & Sabogal, A. (2005). *Una alternativa sostenible: La Guadua. Técnicas de cultivo y manejo* (2a Edición., pp. 1–192). Armenia, Colombia: CRQ.
- Giraldo, R. (2002). Introducción a la geoestadística. Teoría y aplicación. In *Simposio nacional de estadística* (pp. 1–94). Bogotá: Universidad Nacional de Colombia. Facultad de Ciencias. Departamento de Estadística.
- Gritsch, C. ., Abranson, K., Camayo, G. C., Rashid, M., Murphy, R., Camargo, J. C., & Londoño, X. (2004). Anatomical culm analysis of Guadua angustifolia in relation to age, site, and physico-mechanical properties. In *Simposio internacional Guadua*. Pereira, Colombia: UTP.
- Grupo de trabajo para la Certificación Forestal Voluntaria en Colombia. (2007). *Estándares para la certificación forestal voluntaria en Colombia bajo el esquema FSC* (pp. 1–52). Pereira, Colombia: CFV. CARDER. FSC. WWF.
- Grupo de trabajo para la Certificación Forestal Voluntaria en Colombia. (2012). Revisión del estándar para la certificación forestal de guaduales en Colombia. Informe Final. Convenio Interadministrativo 576 de 2011. Cali, Colombia: CARDER. Retrieved from http://www.bosquesflegt.gov.co/publicaciones/estandares_guadua.pdf
- Haridasan, K., & Tewari, S. (2008). Bamboo for Pan India Plantation Programmes - Preliminary Observations from Recent Trials. *Indian Forester*, *3*(134), 314–324.

Retrieved from

<http://www.indianforester.co.in/index.php/indianforester/article/view/715>

- Henao, E., & Rodríguez, J. A. (2011). Cambios en las propiedades físico-mecánicas de culmos de *Guadua angustifolia* como indicadores del estado de madurez. *Recursos Naturales Y Ambiente*, (61), 26–31. Retrieved from http://web.catie.ac.cr/informacion/RFCA/rev61/rna61_p26.pdf
- Hidalgo, O. (2003). *Gift of Gods* (p. 320). Bogotá, Colombia.
- Johnston, K., Ver Hoef, J., Krivoruchko, K., & Lucas, N. (2003). Using ArcGIS Geostatistical Analyst. Redlands, CA: ESRI. Retrieved from http://dusk2.geo.orst.edu/gis/geostat_analyst.pdf
- Kleinn, C., & Morales-Hidalgo, D. (2006). An inventory of *Guadua* (*Guadua angustifolia*) bamboo in the Coffee Region of Colombia. *European Journal of Forest Research*, 125(4), 361–368. doi:10.1007/s10342-006-0129-3
- Läderach, P., Oberthür, T., Cook, S., Estrada, M., Pohlen, J. A., Fisher, M., & Rosales, R. (2011). Systematic agronomic farm management for improved coffee quality. *Field Crops Research*, 120(3), 321–329. doi:10.1016/j.fcr.2010.10.006
- Londoño, X. (2011). El bambú en Colombia. *Biotecnología Vegetal*, 11(3), 143–154.
- Londoño, X., & Clark, L. G. (2004). Distribución, morfología, taxonomía, anatomía, silvicultura y usos de los bambúes del nuevo mundo. In *Memorias: Congreso Colombiano de Botánica* (pp. 1–25). Popayán.
- Londoño, X., & Muñoz, J. E. (2011). Selección, genotipificación y multiplicación de materiales superiores de *Guadua angustifolia* Kunth con fines agroindustriales en el eje cafetero. Sexto informe Proyecto No. MADR2008M6336-3616.
- Lozano, G. (2014). Plan de manejo y labores silviculturales de los guaduales del predio “Maravélez” Municipio de la Tebaida. Vereda La Tebaida. Informe presentado ante la CRQ para la solicitud del permiso de aprovechamiento de *G. angustifolia*. Armenia, Quindío.
- Martínez, O. M., Ríos, A. M., & Niño, J. (2011). *Guadua angustifolia* en la Ecorregión Cafetera colombiana. 2. Cuantificación de carbohidratos libres presentes en extractos. *Recursos Naturales Y Ambiente*, (61), 18–25. Retrieved from http://web.catie.ac.cr/informacion/RFCA/rev61/rna61_p18.pdf
- Mejía G, A., Gallardo, C., Vallejo, J. J., Ramírez, G., Arboleda, C., Durango, S., ... Cadavid, E. (2009). Plantas del género *Bambusa*: importancia y aplicaciones en la industria farmacéutica. *Vitae Revista De La Facultad De Química Y Farmacéutica*, 16(3), 396–405.
- Mejía, N. (2008). CPP. In O. Frith (Ed.), *Mainstreaming Pro-Poor Livelihood. Opportunities with Bamboo* (pp. 51–52). Beijing, China: IFAD, INBAR. Retrieved from <http://www.inbar.int/publications/?did=160>

- Mejía, N. (2013). Acuerdo Regional de competitividad de la guadua y matriz de compromisos 2013-2023. Un acuerdo entre los departamentos y municipios del Paisaje Cultural Cafetero, Patrimonio de la Humanidad. Armenia: Informe Final: contrato 229 de 2013 Carder.
- Mejía, N., & Moreno, R. D. (2013). *Estado del arte de la cadena de la guadua en Colombia 2003-2012. Bases para la visión prospectiva del nuevo acuerdo de competitividad del Eje Cafetero y Valle del Cauca* (p. 106). Pereira: CARDER. MinAmbiente.
- Menéndez, M. (2012). *Aplicación de técnicas geoestadísticas en la estimación de área basimétrica*. Universidad de Oviedo. Retrieved from [http://digibuo.uniovi.es/dspace/bitstream/10651/4229/3/TFM_MiriamMen%C3%A9ndez Fern%C3%A1ndez.pdf](http://digibuo.uniovi.es/dspace/bitstream/10651/4229/3/TFM_MiriamMen%C3%A9ndezFern%C3%A1ndez.pdf)
- Minnesota Department of Natural Resources. (2014). DNRPGS Application. Minnesota: Minnesota Department of Natural Resources. Retrieved from <http://www.dnr.state.mn.us/mis/gis/DNRGPS/DNRGPS.html>
- Miranda-Salas, M., & Condal, A. R. (2003). Importancia del análisis estadístico exploratorio en el proceso de interpolación espacial: caso de estudio Reserva Forestal Valdivia. *Bosque*, 24(2), 29–42. Retrieved from http://www.scielo.cl/scielo.php?script=sci_arttext&pid=S0717-92002003000200004
- Morales, T. (2007). Implementación del modelo SILVCAMARK en operaciones forestales de guadua en proceso de certificación forestal voluntaria. *Scientia et Technica*, XIII(34), 601–606.
- Moreno, R. D. (2006a). *Lineamientos generales para la conformación y operación de núcleos forestales productivos para la guadua*. (pp. 1–64). Pereira, Colombia: Ministerio de Ambiente y Desarrollo Territorial. Programa ambiental GTZ. CARDER.
- Moreno, R. D. (2006b). *Respuesta de los guaduales naturales al manejo silvicultural tradicional* (pp. 1–76). Pereira, Colombia: CARDER. Proyecto Manejo Sostenible de Bosques en Colombia. Programa Ambiental GTZ.
- Mosquera, A. T. (2002). Diseño y tecnocultura alternativas: el caso del “sistema tendinoso.” *Ingeniería Y Competitividad*, 4(1), 25–33.
- Mulla, D. J. (2013). Twenty five years of remote sensing in precision agriculture: Key advances and remaining knowledge gaps. *Biosystems Engineering*, 114(4), 358–371. doi:10.1016/j.biosystemseng.2012.08.009
- Niederhauser, N., Oberthür, T., Kattinig, S., & Cock, J. (2008). Information and its management for differentiation of agricultural products: The example of specialty coffee. *Computers and Electronics in Agriculture*, 61(2), 241–253. doi:10.1016/j.compag.2007.12.001

- Orejuela, J., Echeverri, A. M., & Caro, J. (2002). Estudio de factibilidad económica "Parque Zoológico Valle de Maravéz" - La Tebaida. Informe de Avance II. Armenia: FDQ.
- Ospina, R. (2002). *Factores que determinan las características florísticas y estructurales de los fragmentos dominados por Guadua angustifolia Kunt en el eje cafetero colombiano y su relación con el aprovechamiento de guadua*. Tesis Maestría - CATIE, Turrialba, Costa Rica. Retrieved from <http://orton.catie.ac.cr/cgi-bin/wxis.exe/?IscScript=orton.xis&method=post&formato=2&cantidad=1&expresion=mfn=077708>
- Ospina, R. (2005). Biodiversidad en Guadales. Evaluación y Ajustes al Manejo para su Conservación Román Ospina. In Universidad Tecnológica de Pereira (Ed.), *Diplomado Silvicultura y manejo postcosecha de la guadua*. Pereira.
- Ospina, R., & Finegan, B. (2004). Variabilidad florística y estructural de los bosques dominados por *Guadua angustifolia* en el eje cafetero colombiano. *Recursos Naturales Y Ambiente*, (41), 25–33.
- Ospina, R., & Rodríguez, J. M. (2002). Biodiversidad en guadales: importancia e implicaciones para un buen manejo. In *Seminario - Taller Avances en la investigación sobre guadua*. Pereira, Colombia: UTP.
- Pagiola, S., Agostini, P., Gobbi, J., Haan, C. de, Ibrahim, M., Murgueitio, E., ... Ruíz, J. P. (2004). *Pago por Servicios de Conservación de la Biodiversidad en Paisajes Agropecuarios*. *Environmental economics series* (p. 50). Washington, USA: Banco Mundial.
- Peets, S., Mouazen, A. M., Blackburn, K., Kuang, B., & Wiebensohn, J. (2012). Methods and procedures for automatic collection and management of data acquired from on-the-go sensors with application to on-the-go soil sensors. *Computers and Electronics in Agriculture*, 81, 104–112. doi:10.1016/j.compag.2011.11.011
- Plant, R. E. (2001). Site-specific management: the application of information technology to crop production. *Computers and Electronics in Agriculture*, 30(1-3), 9–29. doi:10.1016/S0168-1699(00)00152-6
- Ramírez, C. (2006). *Gestión de Plagas con Métodos Geoestadísticos*. Universidad Politécnica de Cataluña. Retrieved from [http://mmc2.geofisica.unam.mx/mdiaz/Tesis/2006/Gesti%F3n de Plagas con M%E9todos Geoestad%EDsticos.pdf](http://mmc2.geofisica.unam.mx/mdiaz/Tesis/2006/Gesti%F3n%20de%20Plagas%20con%20M%20E%20todos%20Geoestad%EDsticos.pdf)
- Ramírez, J., Fernandez-Manso, A., Núñez, J., Fernández-Manso, O., Blanco, J., & Castedo, F. (2005). Aplicación de técnicas geoestadísticas en la elaboración de cartografía de existencias a escala comarcal. *Cuad. Soc. Esp. Cienc. For.*, 19, 169–173.
- Riaño, N., Londoño, X., Gómez, J., & López, Y. (2002). Preliminary data on: quantification of the carbon sump effect by guadua (*Guadua angustifolia* Kunth). In *Proceedings of*

the International Workshop on the Role of Bamboo in Disaster Avoidance (pp. 43–48). Guayaquil: INBAR.

- Riaño, N., Londoño, X., López, Y., Gómez, J., & Camayo, G. C. (2002). Planth growth and biomass distribution on *Guadua angustifolia* Kunth in relation to ageing in the Valle del Cauca - Colombia. *Bamboo Science and Culture*, 16(1), 43–51. Retrieved from http://www.bamboo.org/publications/e107_files/downloads/ABSJournal-vol16.pdf#page=3
- Rivera-Posada, H. (2011). La guadua especie nativa fundamental en la construcción de estructuras vivas para la restauración de áreas degradadas por erosión severa y deslizamientos. In *2° Congreso Internacional de Guadua y otros bambúes 2011 y 2a feria de fibras naturales*. Armenia, Colombia: CRQ.
- Rivera-Posada, H., Sinisterra, J. A., & Calle, Z. (2007). Restauración ecológica de suelos degradados por erosión en cárcavas en el enclave xerofítico de Dagua, Valle del Cauca, Colombia. In P. K. Serrato (Ed.), *Cañones colombianos: una síntesis geográfica* (pp. 205–210). Bogotá: IGAC, Imprenta Nacional de Colombia. Retrieved from <http://www.cipav.org.co/pdf/noticias/RESTAURACION-CARCAVA-Dagua.pdf>
- Rodríguez, J. A., & Camargo, J. C. (2009). Erosión y escorrentía: indicadores de respuesta temprana del suelo a distintas coberturas en la zona cafetera de Colombia. *Recursos Naturales Y Ambiente*, (58), 25–31.
- Rodríguez, J. A., Camargo, J. C., & Franco, J. D. (2011). Determinación en campo de la madurez de culmos de *Guadua angustifolia* en el eje cafetero de Colombia. *Recursos Naturales Y Ambiente*, 61(61), 100–106.
- Ruiz-Pérez, M., Zhong, M., Belcher, B., Chen, X., & Maoyi, F. (1998). The Role of Bamboo Plantations Development : China in Rural The Case of Anji County , Zhejiang , China. *World Development*, 27(1), 101–114.
- Seidel, F., Fripp, E., Adams, A., & Dentry, I. (2012). Trazabilidad de la sustentabilidad. Estudio de las tecnologías electrónicas y semielectrónicas de trazabilidad de maderas. Japón: OIMT.
- Sheikha, A. F. El, Chalier, C., Zaremski, A., & Montet, D. (2013). Novel molecular fingerprinting for geographical traceability of timber. *Journal of Tropical Forest Science*, 25(3), 387–392.
- Suárez, J. D. (2011). *Estrategias para el manejo y aprovechamiento de guaduales bajo el esquema de núcleos forestales productivos de guadua*. Tesis Pregrado - Universidad Tecnológica de Pereira, Pereira. Retrieved from <http://repositorio.utp.edu.co/dspace/bitstream/11059/2279/3/63492S939.pdf>
- Takeuchi, C. P. (2004). Comportamiento estructural de la guadua *angustifolia*. Uniones en guadua. *Ingeniería E Investigación*, 24(2), 3–7.
- Timpe, D. (2005). Barcode and RFID Technologies: Alternatives to Log Stamping for Wood Identification in Forestry? Mittuniversitetet.

- Tistl, M., & Velásques, J. A. (2002). Roofs instead of tents: a reconstruction project in the Colombian Coffee Zone after the Earthquake of January 25th, 1999. In L. Yiping (Ed.), *Proceedings of the International Workshop on the Role of Bamboo in Disaster Avoidance* (pp. 140–148). Guayaquil: INBAR.
- Torres, L., Lopez, D. C., Palacio-Mejía, J. D., Duque, M. C., Perez, C. A., González, I. A., & Cárdenas-Henao, H. (2009). Evaluation of the polymorphic of microsatellites markers in *Guadua angustifolia* (Poaceae: Bambusoideae). In D. Z. Li & S. Sungkaew (Eds.), *VIII World Bamboo Congress* (Vol. 5, pp. 64–79).
- Tzoulis, I., & Andreopoulou, Z. (2013). Emerging Traceability Technologies as a Tool for Quality Wood Trade. *Procedia Technology*, 8(Haicta), 606–611. doi:10.1016/j.protcy.2013.11.087
- UNESCO. (2011). Coffee Cultural Landscape of Colombia. UNESCO. Retrieved May 20, 2013, from <http://whc.unesco.org/en/list/1121>
- Von Scheliha, S., & Zahnen, J. (2011). Genetic and isotopic fingerprinting methods – practical tools to verify the declared origin of wood. Documentation of the international conference. Eschborn: Deutsche Gesellschaft für Internationale Zusammenarbeit (GIZ) GmbH. Retrieved from http://pfbc-cbfp.org/docs/news/Fevrier-Avril 2011/GIZ_Conf_doc_Fingerprinting_2010_en_web.pdf
- World Bank. (2014). Climate Change Knowledge Portal for development practitioners and policy makers. *Climate*. Retrieved June 06, 2014, from http://sdwebx.worldbank.org/climateportal/index.cfm?page=country_historical_climate&ThisRegion=Latin America&ThisCCCode=COL#
- Zapata, Á., Murgueitio, E., Mejía, C., Zuluaga, A. F., & Ibrahim, M. (2007). Efecto del pago por servicios ambientales en la adopción de sistemas silvopastoriles en paisajes ganaderos de la cuenca media del río La Vieja, Colombia. *Agroforestería En Las Américas*, (45), 86–92.
- Zhang, N., Wang, M., & Wang, N. (2002). Precision agriculture—a worldwide overview. *Computers and Electronics in Agriculture*, 36(2-3), 113–132. doi:10.1016/S0168-1699(02)00096-0
- Zhang, S., Shen, C., Chen, X., Ye, H., Huang, Y., & Lai, S. (2013). Spatial Interpolation of Soil Texture Using Compositional Kriging and Regression Kriging with Consideration of the Characteristics of Compositional Data and Environment Variables. *Journal of Integrative Agriculture*, 12(9), 1673–1683. doi:10.1016/S2095-3119(13)60395-0
- Zuluaga, A. F., Giraldo, C., & Chará, J. (2011). *Servicios ambientales que proveen los Sistemas silvopastoriles y los beneficios para la biodiversidad. Manual 4, Proyecto Ganadería Colombiana Sostenible* (p. 36). Bogotá, Colombia: GEF, Banco Mundial, Fedegan, CIPAV, Fondo Acción, TNC.

8 ANEXOS

8.1 Anexo. Selección del método Spline para el conjunto de datos.

La selección de cada uno de los métodos de interpolación, bien sea de tipo determinístico o probabilístico, exige la depuración de los parámetros para poder reducir el error estándar de predicción (Root Mean Square Prediction Error - RMSPE) en la estimación de los datos interpolados. RMSPE es un valor de resumen estadístico que calcula la herramienta de validación cruzada a través del asistente de Geostatistical Analyst de ArcGIS, en el cual cada valor medido en campo, es removido y comparado con el valor interpolado para esta ubicación, hasta alcanzar el mínimo margen de error (Johnston et al., 2003).

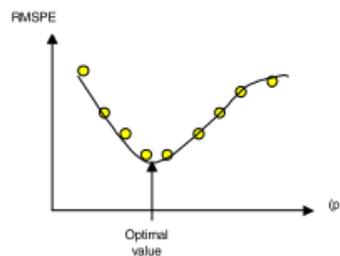


Gráfico 21. Cálculo de RMSPE para cada ubicación.

En las tablas a continuación, se realizaron ajustes en dos de los cuatro métodos que ofrece Spline. Los métodos fueron a) Completely Regularized Spline y b) Inverse Multiquadric, siendo el segundo recomendado para métodos de interpolación determinística en inventarios forestales (J. Ramírez et al., 2005). Los parámetros modificados fueron: a) **Número de datos vecinos para el cálculo**: se dio peso a la búsqueda de pocas parcelas (max 5 y min 1) y varias parcelas (max 15 y min 10). De esta forma se analiza de forma local, los datos más próximos, y global, con un mayor número de muestras; y, b) **Distancia en la búsqueda de datos vecinos**: Se tomó una sola área de influencia y se permitió buscar en un rango amplio (133 m) y en un rango limitado (50 m) sin ningún tipo de orientación o tendencia. Esta variable es complementaria a la anterior, en el sentido que, un rango amplio y un número elevado de parejas de búsqueda, hace un análisis exhaustivo a nivel global y con un margen limitado y número reducido de parejas de datos, hace un análisis local. La tabla resaltada en color amarillo presentó el mínimo margen de error predictivo.

