



**UNIVERSIDAD CATÓLICA
DE SANTIAGO DE GUAYAQUIL**

FACULTAD DE EDUCACIÓN TÉCNICA PARA EL DESARROLLO

CARRERA DE INGENIERÍA AGROPECUARIA

TEMA

**Evaluación del método de muestreo angular para el inventario
de plantaciones forestales de Teca en la
Región Costa del Ecuador**

AUTOR

Mora Espinoza, Javier Alexander

**Trabajo de titulación previo a la obtención del título de
INGENIERO AGROPECUARIO**

TUTOR

Ing. Alberto Peñalver Romeo, Ph. D.

Guayaquil, Ecuador

Marzo de 2019



**UNIVERSIDAD CATÓLICA
DE SANTIAGO DE GUAYAQUIL**

FACULTAD DE EDUCACIÓN TÉCNICA PARA EL DESARROLLO

CARRERA DE INGENIERÍA AGROPECUARIA

CERTIFICACIÓN

Certificamos que el presente Trabajo de Titulación fue realizado en su totalidad por **Mora Espinoza Javier Alexander**, como requerimiento para la obtención del Título de **Ingeniero Agropecuario**.

TUTOR

Ing. Peñalver Romeo Alberto, Ph.D.

DIRECTOR DE LA CARRERA

Dr. Franco Rodríguez, John Eloy, Ph.D.

Guayaquil, a los 19 días del mes de marzo del año 2019



**UNIVERSIDAD CATÓLICA
DE SANTIAGO DE GUAYAQUIL**

FACULTAD DE EDUCACIÓN TÉCNICA PARA EL DESARROLLO

CARRERA DE INGENIERÍA AGROPECUARIA

DECLARACIÓN DE RESPONSABILIDAD

Yo, **MORA ESPINOZA JAVIER ALEXANDER**

DECLARO QUE:

El Trabajo de Titulación, **Evaluación del método de muestreo angular para el inventario de plantaciones forestales de Teca en la Región Costa del Ecuador**, previo a la obtención del Título de **Ingeniero Agropecuario**, ha sido desarrollado respetando derechos intelectuales de terceros conforme las citas que constan en el documento, cuyas fuentes se incorporan en las referencias o bibliografías. Consecuentemente este trabajo es de mi total autoría.

En virtud de esta declaración, me responsabilizo del contenido, veracidad y alcance del Trabajo de Titulación referido.

Guayaquil, a los 19 días del mes de marzo del año 2019

AUTOR

Mora Espinoza, Javier Alexander.



**UNIVERSIDAD CATÓLICA
DE SANTIAGO DE GUAYAQUIL**

FACULTAD DE EDUCACIÓN TÉCNICA PARA EL DESARROLLO

CARRERA DE INGENIERÍA AGROPECUARIA

AUTORIZACIÓN

Yo Mora Espinoza, Javier Alexander

Autorizo a la Universidad Católica de Santiago de Guayaquil a la **publicación** en la biblioteca de la institución del Trabajo de Titulación, **Evaluación del método de muestreo angular para el inventario de plantaciones forestales de Teca en la Región Costa del Ecuador**, cuyo contenido, ideas y criterios son de mi exclusiva responsabilidad y total autoría.

Guayaquil, a los 19 días del mes de marzo del año 2019

AUTOR

Mora Espinoza, Javier Alexander.



**UNIVERSIDAD CATÓLICA
DE SANTIAGO DE GUAYAQUIL**
FACULTAD DE EDUCACIÓN TÉCNICA PARA EL DESARROLLO

CARRERA DE INGENIERÍA AGROPECUARIA

CERTIFICACIÓN URKUND

La Dirección de las Carreras Agropecuarias revisó el Trabajo de Titulación “Evaluación del método de muestreo angular para el inventario de plantaciones forestales de Teca en la Región Costa del Ecuador”, presentado por el estudiante **Mora Espinoza, Javier Alexander**, de la carrera de Ingeniería Agropecuaria, donde obtuvo del programa URKUND, el valor de 0 % de coincidencias, considerando ser aprobada por esta dirección.

URKUND	
Documento	Mora Espinoza, J. UTE B 2018.docx (D47905680)
Presentado	2019-02-13 20:57 (+01:00)
Presentado por	ute.fetd@gmail.com
Recibido	alfonso.kuffo.ucsg@analysis.arkund.com
Mensaje	TT MORA ESPINOZA UTE B 2018 Mostrar el mensaje completo
	0% de estas 33 páginas, se componen de texto presente en 0 fuentes.

Fuente: URKUND-Usuario Kuffó García, 2019
Certifican,

Ing. John Franco Rodríguez, Ph. D
Director Carreras Agropecuarias
UCSG-FETD

Ing. Alfonso Kuffó García, M. Sc.
Revisor - URKUND

AGRADECIMIENTO

Agradezco a Dios, por permitirme cumplir una meta más en mi vida.

Gracias a mis padres, porque ellos fueron el motor principal para seguir cada día y alcanzar mi objetivo, gracias a mi familia que me siempre estuvieron prestos para mí, brindándome fuerzas y el apoyo incondicional que necesitaba para alcanzar este logro.

A mis maestros, les doy las gracias a todo y cada uno de ellos por compartir conmigo una pequeña parte de su sabiduría y por tener en el transcurso de esta etapa y a mi tutor el Ing. Alberto Peñalver Romeo, por impartir sus conocimientos en este trabajo.

Gracias a mis amigos y compañeros de aula, por su sinceridad, confianza y cariño en estos años de aprendizaje.

DEDICATORIA

Este trabajo se lo dedico a mis padres, por permanecer siempre conmigo y apoyarme en todo momento, siempre prestos para ayudarme e impulsarme, a toda mi familia en especial a mi tío Jesús Mora Vera, que desde el cielo está feliz por este logro cumplido.



**UNIVERSIDAD CATÓLICA
DE SANTIAGO DE GUAYAQUIL**

FACULTAD DE EDUCACIÓN TÉCNICA PARA EL DESARROLLO

CARRERA DE INGENIERÍA AGROPECUARIA

TRIBUNAL DE SUSTENTACIÓN

Ing. Alberto Peñalver Romeo, Ph.D.
TUTOR

Ing. John Eloy Franco Rodríguez, Ph.D.
DIRECTOR DE CARRERA

Ing. Noelia Carolina Caicedo Coello, M.Sc.
COORDINADORA DEL UTE



**UNIVERSIDAD CATÓLICA
DE SANTIAGO DE GUAYAQUIL**

FACULTAD DE EDUCACIÓN TÉCNICA PARA EL DESARROLLO

CARRERA DE INGENIERÍA AGROPECUARIA

CALIFICACIÓN

Ing. Alberto Peñalver Romeo, Ph.D.
TUTOR

ÍNDICE GENERAL

1 INTRODUCCIÓN	16
1.1 Objetivos	18
1.1.1 Objetivo general.....	18
1.1.2 Objetivos específicos.	18
1.2 Hipótesis	18
2 MARCO TEÓRICO	20
2.1 Inventarios forestales	20
2.2 Variables dasométricas	21
2.3 Estructuras de rodales	22
2.4 Diseño de muestreo para inventarios forestales	23
2.4.1 Proceso para la elaboración de inventarios forestales.....	26
2.5 Registro y procesamiento de datos	27
2.6 Métodos para la estimación de volumen, biomasa y fijación de carbono	28
2.6.1 Volumen de madera.....	28
2.6.2 Biomasa y fijación de carbono.	29
2.6.3 Fijación de carbono.....	31
2.7 Ecuaciones de estimación de volumen, biomasa y fijación de carbono para plantaciones de teca	34
2.8 Muestreo angular o método de Bitterlich.....	35
2.8.1 Derivación del principio básico.	36
2.9 Corrección por pendiente	38
3 MARCO METODOLÓGICO	40
3.1 Localización del área de estudio	40
3.2 Muestreo forestal	41
3.3 Medición de variables de árboles y parcelas.....	42

3.4 Simulación del muestreo angular	43
3.5 Variables seleccionadas para el contraste de muestreo	46
3.6 Procesamiento de datos y análisis estadístico	47
3.7 Evaluación de la eficiencia relativa del método de Bitterlich	49
4 RESULTADOS Y DISCUSIÓN.....	50
5 CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES	58
5.1 Conclusiones.....	58
5.2 Recomendaciones.....	58
BIBLIOGRAFÍA	

ÍNDICE DE TABLAS

Tabla 1.	Número de parcelas de muestreo	41
Tabla 2.	Variables Dasométricas.....	46
Tabla 3.	Simbología expresada en los resultados	47
Tabla 4.	Variable Área basal por hectárea	50
Tabla 5.	Variable Número de árboles por hectárea	50
Tabla 6.	Variable Diámetro promedio	51
Tabla 7.	Variable Altura promedio por árbol	52
Tabla 8.	Variable Volumen por hectárea	52
Tabla 9.	Variable Biomasa	53
Tabla 10.	Variable Carbono contenido en biomasa.....	53
Tabla 11.	Variable Fijación de Dióxido de Carbono (CO ₂).....	54

ÍNDICE DE GRÁFICOS

Gráfico 1. Conteo de árboles por muestreo angular	36
Gráfico 2. Principio básico del método.....	37
Gráfico 3. Ubicación geográfica del predio.	41
Gráfico 4. Distribución de las parcelas en el predio Morondava	42
Gráfico 5. Distribución de diámetros	44
Gráfico 6. Plano de parcela con coordenadas	45
Gráfico 7. Parcela circular de 500 m ²	45
Gráfico 8. Gráfico radial de la precisión en todos los métodos calculados	455
Gráfico 9. Gráfico radial de la precisión en todos los métodos calculados	4555

RESUMEN

Se contrasta la precisión y eficiencia estadística entre dos métodos de inventario, el muestreo angular y el muestreo de parcelas de superficie fija, para la estimación de variables dasométricas en plantaciones forestales de Teca de la Región Costa de Ecuador. Se realizó un muestreo simple aleatorio sin reemplazo para delimitar 31 parcelas circulares de 500 m² en una plantación de tres años. En cada parcela se midió el diámetro normal, la altura de cada árbol y los tiempos de trabajo, registrando además su posición en el sistema de referencia WGS84-UTM-17S mediante un RTK. A partir de las variables medidas en campo se calculó el número de árboles por hectárea, diámetro de área basal media, área basal total, altura promedio de Lorey, volumen total, biomasa aérea, fijación de CO₂ y contenido de carbono en la biomasa aérea. A partir de la georreferenciación de cada árbol en la parcela circular de área fija se simuló la selección de los árboles de acuerdo a los factores de área basimétrica 0.5, 1, 1.5 y 2. Para los datos generados mediante la simulación del muestreo angular se calcularon los estadísticos de tendencia central y dispersión de las variables, aplicando un análisis ANOVA y prueba de Tukey para evaluar las diferencias de medias de las variables. Los resultados obtenidos evidencian que el método de conteo angular es suficientemente preciso para la estimación de las principales variables dasométricas de plantaciones jóvenes de teca, presentado además una mayor eficiencia en relación al muestreo de parcelas de superficie fija.

Palabras claves: Método Bitterlich, técnicas de muestreo, Inventario Forestal, *Tectona grandis*, simulación.

ABSTRACT

The precision and statistical efficiency are contrasted between two inventory methods, angular sampling and sampling of fixed surface plots, for the estimation of dasometric variables in Teak plantations of the Ecuadorian Coast Region. A simple random sampling without replacement was carried out to delimit 31 circular plots of 500 m² in a three-year plantation. In each plot the normal diameter, the height of each tree and the working times were measured, also registering its position in the reference system WGS84-UTM-17S by means of an RTK. From the variables measured in the field, the number of trees per hectare, average basal area diameter, total basal area, average height of Lorey, total volume, aboveground biomass, CO₂ fixation and carbon content in the aerial biomass were calculated. From the georeferencing of each tree in the circular plot of fixed area the selection of the trees was simulated according to the Basimetric Area Factor 0.5, 1, 1.5 and 2. For the data generated by the simulation of the angular sampling they were calculated the statistics of central tendency and dispersion of the variables, applying an ANOVA analysis and Tukey test to evaluate the mean differences of the variables. The results obtained show that the angular count method is sufficiently precise for the estimation of the main dasometric variables of young teak plantations, also presenting a higher efficiency in relation to the sampling of fixed surface plots.

Keywords: Bitterlich method, sampling techniques, Forest Inventory, *Tectona grandis*, simulation.

1 INTRODUCCIÓN

Los bosques y plantaciones forestales cumplen funciones protectoras de los ecosistemas naturales y artificiales que constituyen el hábitat humano y de todas las especies del planeta; además son reguladores de las emisiones de los gases de efecto invernadero absorbiendo el dióxido de carbono emitido en el ambiente. Estas plantaciones nos proveen de madera y de PFNM (Productos Forestales No Madereros), en los que encontramos la resina, látex entre otros elementos.

Entre las funciones ambientales que tienen los bosques se destaca la capacidad de fijar carbono atmosférico y esto, en el contexto de la necesidad de mitigar el impacto del cambio climático provocado por el exceso de gases invernaderos en la atmósfera, es una función muy importante que en la actualidad cobra un interés especial para la gestión forestal.

Los inventarios forestales recolectan datos de bosques naturales y plantados, las técnicas de muestreo son usadas como la forma adecuada para la recolección de estos datos, obteniendo información detallada que permite la evaluación de los ecosistemas forestales y sus características dentro y dasométricas; el diseño del inventario forestal dependerá de los requerimientos de información para la que se haya planificado.

Un elemento importante en el diseño de muestreo para la ejecución de los inventarios forestales lo constituye la determinación del tipo y cantidad de unidades de muestra, y el método de selección y distribución de estas, donde serán medidas las diferentes variables de los bosques, tales como diámetros y altura de árboles, densidad volúmenes totales y comerciales, biomasa, fijación de carbono, entre otras. Es una práctica común en nuestro país el uso de parcelas de superficie y formas fijas como unidades de muestreo; esta unidad de muestreo genera un tiempo de trabajo considerable para su

levantamiento en el campo, entiéndase el trabajo de topografía para su localización y delimitación en el terreno, para luego en su interior realizar las mediciones de las variables dendrométricas.

Existen métodos alternativos de muestreo que pueden resultar más eficientes en cuanto al consumo de tiempo necesario para la obtención de la información del inventario forestal, este es el caso de la unidad de muestreo de conteo angular o de superficie variable, también conocida como parcelas de Bitterlich, donde los árboles son seleccionados con probabilidad proporcional al tamaño de los mismos; generalmente el establecimiento de estas parcelas en campo consumen menos tiempo que su equivalente de parcelas de superficie fija.

La investigación realizada mediante el presente Trabajo de Titulación contrasta la precisión y eficiencia de estas técnicas de muestreo mediante, parcelas de superficie fija y variables en el inventario de plantaciones de teca en la región costa de Ecuador.

Esta investigación está enmarcada en el proyecto de “Evaluación de tecnología de detección remota para la estimación de biomasa de Teca en la Región Costa del Ecuador” generado en la Universidad Católica de Santiago de Guayaquil (UCSG), donde el autor participa como asistente de investigación.

La teca es una de las especies de frondosas tropicales más estudiadas. En las que abarcan diversos aspectos de la explotación y la utilización de bosques y plantaciones de esta. La teca es una de las más importantes especies de plantación en varios países tropicales. Además, es un cultivo de fácil adaptación a zonas secas y húmedas, sin necesidad de muchos cuidados en sus labores culturales por lo que lo hace un cultivo forestal muy popular en nuestro país.

En el Ecuador especialmente en la región Costa la teca (*Tectona grandis* Linn F.) es una especie utilizada para la reforestación, esto ocurre debido a que este árbol presente gran adaptabilidad a climas secos y húmedos, además de su gran demanda en el mercado asiático donde su madera es exportada, según el MAG (2018).

Por lo expuesto, el presente Trabajo de Titulación tuvo los siguientes objetivos:

1.1 Objetivos

1.1.1 Objetivo general.

Evaluar las técnicas de muestreo angular para la determinación de los índices dasométricos y caracterización de la estructura de las plantaciones forestales de Teca, en la región Costa del Ecuador.

1.1.2 Objetivos específicos.

- Aplicar el método de muestreo angular en plantaciones de teca utilizando diferentes Factores de Área Basimétrica (FAB) mediante un procedimiento de simulación.
- Contrastar la precisión en la estimación de las variables dasométricas obtenidas mediante muestreo angular con la obtenida mediante muestreos con parcela de superficie fija.
- Evaluar la eficiencia relativa de la estimación de las variables dasométricas obtenidas mediante muestreo angular con las obtenidas mediante muestreos con parcela de superficie fija.

1.2 Hipótesis

1. El muestreo angular para la estimación de variables dasométricas en plantaciones de Teca es tan preciso como el muestreo con unidades de superficie fija.

2. La eficiencia relativa del muestreo angular es superior a la de parcelas de superficie fija tomando en consideración los tiempos de trabajo involucrados en la ejecución de los métodos de muestreo.

2 MARCO TEÓRICO

2.1 Inventarios forestales

Los inventarios forestales son metodologías de recolección de datos sobre los recursos forestales de una zona determinada, que permiten la evaluación del estado actual del ecosistema forestal, natural o plantado, tales como la vegetación, los componentes asociados y muchas de las características del área de tierra en la que se encuentra el bosque (Van Laar y Akça, 2007).

Los objetivos del inventario dependerán de los requerimientos de información para las que se diseña, la literatura forestal comprende un número considerable de valiosos libros de texto sobre el tema entre los que se mencionan a Van Laar y Akça, (2007); Kershaw, Ducey, Beers y Husch, (2016).

Los inventarios se pueden clasificar, de acuerdo a sus objetivos, en inventarios exploratorios, inventarios para manejo de bosques naturales y plantaciones e inventarios para aprovechamiento forestal según Keshaw *et al.*, (2016); en la actualidad los inventarios forestales incluyen otros objetivos relacionados con aspectos de la biodiversidad, la producción de biomasa y el secuestro de carbono y en este sentido Lorenz, Varjo y Bahamondez, (2005, p. 1) precisan la necesidad de información a nivel cada vez más global para la generación de modelos de gestión de los ecosistemas forestales, tomando en cuenta los efectos de los cambios globales, la desertificación, la producción de agua y la interacción de estos con la biosfera.

Los inventarios también pueden ser clasificados de acuerdo con las técnicas estadísticas que son utilizadas en ellos, siendo las técnicas de muestreo probabilístico las que mayor aplicación encuentran en el diseño de los inventarios forestales dada la magnitud de las superficies objeto de estudio, donde el conteo y medición de todos los elementos de intereses, en

la práctica, imposible, solo en casos especiales pueden aplicarse métodos de conteo y medición total, llamados censos (FAO, 1981, p. 40).

De acuerdo con Lorenz *et al.*, (2005, p.3) la ejecución de un inventario forestal requiere también de la recopilación de datos de calidad y representativos, tanto cuantitativos como cualitativos, a diversas escala espaciales por lo que la preparación de mapas para la determinación de la magnitud de las áreas terrestres de interés forestal y otras características es de especial importancia, Köhl, Magnussen, y Marchetti, (2006); Kershaw *et al.*, (2016) entre otros autores destacan que las herramientas más utilizadas para la obtención de estos datos son el uso de fotografías aéreas e imágenes satelitales, mediante la detección y localización de objetos mediante diferentes tipos de sensores montados sobre variadas plataformas, aviones, satélites, drones, vehículos terrestres, como es el caso de las imágenes convencionales, infrarrojas, multi e hiperespectrales obtenidas mediante cámaras fotográficas y sensores láser (LiDAR), radar y la aplicación de Sistemas de Información Geográfica (SIG), de Posicionamiento Global (GPS) y la fusión de estas tecnologías.

2.2 Variables dasométricas

Los inventarios forestales registran las variables que caracterizan a los arboles individuales, las poblaciones de árboles y su distribución sobre el terreno, la determinación de estas variables de los bosques son la base informativa para la gestión técnica y económica de los bosques y plantaciones forestales (Aldana, Frías, Peñalver y Ares, 1995 p.11).

Las variables que caracterizan a los arboles individuales y las poblaciones de árboles, en el lenguaje de la Dasonomía, se llaman variables dendrométricas y dasométricas respectivamente, las principales variables dendrométricas son el diámetro o circunferencia del árbol medido a la altura de 1.3 m del suelo, la altura total medida desde el suelo hasta el ápice o punto

final de la copa del árbol, y otras que están relacionadas con las dimensiones de la copa del árbol, su longitud o altura de copa y el área de su proyección horizontal sobre el suelo, otras variables son cualitativas y se refieren a la calidad sanitaria, comercial que caracterizan sociológicamente al árbol con respecto a sus vecinos, la identificación de la especie botánica y la edad del árbol son también variables que se registran en los trabajos de inventario (Aldana, 2008; Kershaw et al., 2016).

Otras importantes variables son deducidas de las anteriores y están vinculadas a la superficie donde crece el bosque, estas son las variables dasométricas, tales como el número de árboles, volumen total y comercial, área basal, producción de biomasa y fijación de carbono. Las definiciones y simbologías de las variables dendro y dasométricas han sido estandarizadas por Soest, Ayrál, Schober y Hummel, (1969) y las técnicas, métodos y procedimientos para la medición y estimación de esta variable pueden ser estudiados en Caillez, (1981); Aldana (2008); Kershaw et al. (2016) entre otros.

2.3 Estructuras de rodales

En los bosques y plantaciones forestales se distinguen grupos de árboles, llamados rodales, que ocupan un área dada y que tienen similares características o combinación de características e importancia para la gestión forestal (Aldana, *et al.*, 1995).

De acuerdo con Kershaw *et al.*, (2016, p. 274), entre otros autores, la estructura del rodal es el resultado de los hábitos de crecimiento de las especies, las condiciones ambientales, la competencia intra e interespecies, alteraciones de origen natural, plagas, enfermedades, eventos geológicos y climáticos y las prácticas de manejo forestal bajo las cuales el rodal se origina y desarrolla.

La estructura del rodal, en sus dimensiones horizontal y vertical, puede caracterizarse de acuerdo a su composición en especies, por la distribución de la edad, de los diámetros, alturas y copas de los árboles en relación a la superficie del terreno que ocupan, este último indicador, llamado espesura, es al igual que el número de árboles, el área basal, el volumen de madera y el peso de la biomasa, expresados en unidades por hectárea, medidas del aprovechamiento del potencial productivo del sitio forestal y de la competencia entre árboles (Pardé y Bouchon, 1994).

2.4 Diseño de muestreo para inventarios forestales

Según González, Gallegos, Hernandez y Morales (2002), para obtener información sobre las variables dasométricas, y dendrométricas, que caracterizan la estructura horizontal y vertical de los bosques y plantaciones, la práctica más común es el muestreo estadístico, que consiste en hacer observaciones sobre partes de una población (el bosque y sus características) para obtener estimaciones que sean representativas de la población forestal.

Un diseño de muestreo se determina por el tipo de unidades utilizadas, el número de éstas, la forma de seleccionar y distribuir estas unidades en el área forestal, así como los procedimientos para realizar mediciones y analizar el resultado. Los muestreos se basan en la teoría estadística, utilizando los indicadores de tendencia central y dispersión para el cálculo de los errores en las estimaciones de las variables forestales dependiendo de la precisión deseada (Moscovich y Brena, 2006; Macedo, 2012).

El tamaño de la muestra se refiere al número de unidades seleccionadas de la población y la intensidad de esta se refiere a la proporción o fracción de la población incluida en la sección tomada. Para cualquier tamaño de muestra dado, puede haber muchas posibles combinaciones diferentes de unidades que podrían seleccionarse de la población. El tamaño de la muestra está determinado en función de la variabilidad del parámetro a

estimar, coeficiente de variación, el nivel de significación estadístico adoptado en correspondencia con la distribución de densidad probabilística usada, por ejemplo el valor $t=1.96$ tomado de la distribución *t de Student*, el error de muestreo prefijado, e , y en dependencia de si la población es infinita o finita, en poblaciones finitas utilizamos un factor de corrección para la variable N que representa el total de número de muestras en la población (el bosque), sin embargo, como una cuestión práctica, las poblaciones finitas muy grandes se pueden tratar como infinitas (Cochran, 1977).

Determinar el tamaño de la muestra es uno de los pasos más importantes a la hora de desarrollar un diseño de muestreo, si la muestra es demasiado pequeña, el nivel de incertidumbre será grande y si la muestra es demasiado grande, el coste será innecesariamente elevado (McRoberts, Tomppo, y Czaplewski, 1992, p.4).

$$(infinitas) \quad n = \frac{CV^2 t^2}{e^2} \quad ; \quad (finitas) \quad n = \frac{N t^2 (CV)^2}{N(e)^2 + t^2 (CV)^2}$$

Dónde:

n = tamaño de muestra

CV = Coeficiente de variación.

t = estadístico de la distribución *t de Student* correspondiente al nivel de significación establecido, ej. $A=0.05$ (95 % de probabilidad).

e = error de muestreo fijado.

Por definición, en cumplimiento de los supuestos teóricos de la estadística probabilística, los muestreos son aleatorios, el método básico es el muestreo simple aleatorio; algunas estrategias de agrupamiento de las unidades de muestreo con vistas a la disminución de los errores de muestreo pueden ser aplicadas, como es el caso de la estratificación y los conglomerados. Una alternativa la constituyen los muestreos sistemáticos en los que, una vez seleccionada aleatoriamente la primera unidad de muestra,

las demás, de acuerdo con algún patrón preestablecido, quedan automáticamente seleccionadas (FAO, 1981, p.20). El muestreo puede ser con reemplazo y sin reemplazo (Cochran, 1977, p. 205), sin embargo, para las aplicaciones forestales se prefiere el muestreo sin reemplazo para evitar la remediación de unidades de muestreo dados los costos involucrados (FAO, 1981, p. 21).

Aspecto relevante en el diseño del muestreo para el inventario forestal lo constituye la definición del tipo de unidad de muestreo. Dos casos se presentan, en el primero la unidad de muestreo es el árbol individual, método utilizado cuando el interés está en las características individuales de los árboles, estado fitosanitario, calidad comercial, silvícola, forma, volumen, método muy utilizado para la construcción de ecuaciones alométricas; en el segundo caso la unidad de muestra está constituida por un grupo de árboles que crecen sobre una porción de superficie preestablecida: la parcela de superficie y forma fija, donde la selección de los árboles está relacionada directamente al área y forma de la parcela y a la frecuencia de los individuos que están dentro de ella, como indican los siguientes autores Alder, (1980); Caillez, (1980); Pardé y Bouchon, (1994); Picard, Saint-Andre y Henry (2012).

Es de destacar un método alternativo de muestreo, desarrollado a finales de la década de 1940s, por el forestal austriaco Walter Bitterlich (Bitterlich, 1952, 1984; Burkhart, 2008) donde los árboles que constituyen la unidad de muestreo son seleccionados con probabilidad proporcional a sus dimensiones, por ejemplo el diámetro, el área basal o a la distancia de los árboles respecto a un punto o línea determinada, y la unidad de muestreo, la parcela, no tiene una superficie predefinida, el método se conoce muestreo puntual, parcelas de superficie variable o método de Bitterlich. La teoría estadística (Cochran, 1977, p.297) reconoce este método como *PPS*, por sus siglas en inglés *Probability Proportional to Size*.

Resultados de investigación que profundizan en la teoría y práctica de los procedimientos de muestreo se pueden consultar en Farias, Soares, Souza, y Leite. (2002), Ståhl, Ringvall, Gove, y Ducey (2002), Burga, Ríos, Tello, Urquiza y del Castillo (2010) Šmelko (2013), Lionjanga, y Pereira (2014), Rice, Weiskittel, y Wagner (2014).

El método de muestreo de área fija fue una de las primeras técnicas desarrolladas para la selección de árboles para componer una muestra. A pesar de la amplia aplicación de este método los inventarios forestales, presenta algunas desventajas, por ejemplo, la mayor cantidad de árboles seleccionados en las unidades de muestra y los mayores costes de instalación de la parcela, en comparación con los métodos que utilizan unidades de área variable. Como lo indican los siguientes autores: Vastaranta, González, Luoma, Saarinen, Holopainen y Hyyppä (2015); Fiorentin, *et al.*, (2016).

2.4.1 Proceso para la elaboración de inventarios forestales.

En general, los principales pasos a seguir en el diseño de un inventario forestal por muestreo son: (Peñalver, 2018)¹

1. Definir los objetivos del inventario, madera, silvicultura, biodiversidad, biomasa, secuestro de carbono, entre nosotros.
2. Determinar la superficie del área de estudio y su ubicación espacial mediante el uso de la información cartográfica de la zona objeto de estudio, fotografías aéreas y satelitales y la implementación de tecnologías de Sistemas de Información Geográficos (SIG).
3. Seleccionar el tipo de muestreo que será aplicado, probabilístico o no probabilístico y establecer el método de selección de la muestra de la población, con reemplazo o sin reemplazo.

¹ Consulta personal a Alberto Peñalver Romeo, experto en inventarios forestales, UCSG, Ecuador.

4. Determinar el tipo de unidad de muestreo en cuanto a su tamaño, área, y forma, en caso de preferirse unidades de muestreo de superficie fija, en contraposición a las unidades o parcelas de superficie variable, ejemplo método de Bitterlich.
5. Determinar el tamaño de la muestra, esto es el número de unidades de muestreo, mediante la formulación estadística y/o preestableciendo la intensidad del muestreo:
6. Establecer los procedimientos de medición, registro, control, procesamiento y presentación de los resultados del inventario.

2.5 Registro y procesamiento de datos

El vertiginoso desarrollo de las tecnologías de computación y de comunicación en las últimas décadas ha dotado a los inventarios forestales de poderosas herramientas para el registro, procesamiento y edición de los datos de resultados de los inventarios. Numerosas aplicaciones informáticas se han desarrollado, incluso para *smartphones* como se evidencia en las investigaciones realizadas por Ugalde Arias, (2002); Bravo, Rivas, Monreal y Ordoñez (2005); Kinyanjui, Latva-Käyrä, Bhuneshwar, Kariuki, Gichu, & Wamichwe (2014).

Se agregan las aplicaciones de plataformas informáticas, internet, que utilizan sistemas donde el equipo o instrumento seleccionado para el trabajo de toma de datos en tiempo real envía la información al ordenador, incluyen *software* para procesamiento de los datos incluyendo muchas más funcionalidades en la interfaz como combinaciones de mapeo participativo con imágenes en línea, acceso y transmisión desde cualquier lugar y permiten la interpretación participativa de la imagen en el entorno de clasificación (Letourneau, (2017) y Leinonen, Koskinen, Makandi, Mauya, y Käyhkö, (2018).

2.6 Métodos para la estimación de volumen, biomasa y fijación de carbono

2.6.1 Volumen de madera.

La determinación del volumen maderable de los bosques naturales y plantados ha sido uno de los objetivos principales de los inventarios forestales para fines de manejo y aprovechamiento, donde el interés radica en el volumen de madera contenido en el tronco de los árboles y eventualmente de ramas con dimensiones utilizables como madera. Los métodos para la medición directa e indirecta del volumen es objeto de estudio de la Dasonomía y es parte de la formación curricular de los profesionales forestales, en síntesis todas las metodologías se basan en la semejanza de la forma de los troncos de los árboles, fustes, con alguna figura geométrica, cilindros, conos y otras formas de sólidos en revolución derivados de estos, en Anuchin (1970); Loetsch, Zohrer y Haller (1973); Alder (1980); Caillez (1980); Aldana (2008) y Parde y Bouchon (1994) pueden revisarse los fundamentos matemáticos de la cubicación de árboles .

La medición directa del volumen es prácticamente imposible dado el tamaño y peso de los árboles, por lo que se recurre al derribo de árboles muestras donde son medidos a lo largo de su eje las circunferencias o diámetros de sus secciones trasversales, de acuerdo a algún protocolo preestablecido y mediante trabajo de oficina aplicar fórmulas geométricas de cálculo de volumen que resulten apropiadas a las formas de las secciones del tronco, algunos instrumentos forestales permiten la medición a distancia de los diámetros y alturas a lo largo del eje del árbol en pie, mención especial merece el *Spiegel Relaskop* desarrollado por el investigador Bitterlich, (1952 y 1984), hoy se construyen variados instrumentos ópticos y electrónicos que integran tecnologías de “tele medición láser”, como es el relaskop electrónico que tiene los mismos principios que el ideado por Bitterlich, varía en sus funciones por la rapidez y precisión con la que ejecuta sus acciones ya que dispone de un sensor de inclinación para medición de alturas y diámetros

de árboles a cualquier altura, además se puede introducir la distancia mediante el teclado o con la conexión de un distanciómetro láser que este dispositivo contiene. Otra ventaja es la transferencia de datos directamente al computador para poder ser procesados de manera rápida y eficiente (Gis-Ibérica, s/f, párr. 1-2).

La medición indirecta, sin recurrir al derribo del árbol, se fundamenta en el establecimiento de relaciones alométricas entre las variables de los árboles de más fácil medición, como es el diámetro o circunferencia normal y su altura total o comercial, y utilizar algún modelo matemático, construido por técnicas estadísticas de análisis de regresión y similares para estimar el volumen total o parcial del árbol, diversas ecuaciones han sido generadas para diferentes especies y grupos de especies en diferentes regiones del mundo, para el caso particular de la especie teca, objeto de esta investigación, pueden darse datos que afirman los trabajos publicados por Warner, Jamroenprucksas y Puangchit, (2016); Vásquez (2011) Moret, Jerez y Mora, (1998); Heredia (2003).

2.6.2 Biomasa y fijación de carbono.

El Grupo Intergubernamental de Expertos sobre Cambio Climático (IPCC, 2003, Anexo A: G.2) define la biomasa a todo material orgánico que existe sobre la superficie del suelo como por debajo de este, tanto vivo como muerto, por ejemplo, árboles, cultivos, pastos, hojarasca, raíces, entre otros y precisa la definición de biomasa aérea forestal como toda la biomasa viva por encima del suelo incluyendo el tronco, el tocón, ramas, corteza, semillas y hojas; mientras que la biomasa por debajo del suelo se compone de todas las raíces vivas excluyendo raíces finas, menores de 2 mm de diámetro.

El IPCC, (1996, párr. 7) agrupa los métodos de estimación de biomasa, tanto aérea como subterránea, en métodos indirectos y directos, en los primeros se calcula la biomasa del árbol con ecuaciones o modelos

matemáticos contruidos por medio de análisis de regresión entre variables de los árboles, tales como el diámetro normal (medido a la altura del pecho, DAP), la altura comercial (hc) y la altura total (ht), el crecimiento diamétrico, el área basal entre otras.

Brown (1997, pp. 19-22) indica que también se puede estimar la biomasa a partir del volumen del fuste, y usar luego la densidad básica de la madera para calcular el peso seco y un factor de expansión para calcular el peso total del árbol. Los métodos directos consisten en cortar el árbol y separar los componentes de su biomasa, tronco, ramas, hojas y si es el caso raíces, hojarasca en descomposición sobre el suelo y otras fracciones de biomasa y pesarlos en húmedo, en el sitio del derribo del árbol, para posteriormente secarlos en estufa y determinar el peso seco.

Las metodologías de determinación de la biomasa también pueden clasificarse de acuerdo a las tecnologías aplicadas para ello, es el caso de las que utilizan métodos basados en mediciones de campo mediante muestreo destructivo y la elaboración de ecuaciones alométricas que relacionan la biomasa con el volumen (Ketterings, Coe, van Noordwijk, y Palm, 2001, p.200); métodos basados en tecnologías de teledetección utilizando sensores remotos instalados en diversas plataformas aéreas (satélites, aviones, drones) y terrestres; y tecnologías basada en sistemas de información geográficos (Lu, 2005, p. 2515); (Campelo-de Santana, 2014, p.21); (Domingo, Lamelas-Gracia, Montealegre-Gracia y de la Riva-Fernández, 2017, pp. 387-389), para generar estimaciones de biomasa en diversos ecosistemas.

El Manual de Picard *et al.* (2012), abarca las etapas de construcción de los modelos alométricos para estimación de biomasa de los árboles a partir de la medición de los árboles sobre el terreno, es un documento particularmente útil para los países que no disponen aún de mediciones y de modelos de ecuaciones adaptados a sus formaciones forestales.

Existen gran variedad de ecuaciones matemáticas para estimar la biomasa de un árbol o de sus fracciones, Diéguez-Aranda *et al.*, (2009, pp. 79-80) presentan un resumen de los modelos matemáticos utilizados en Europa para las especies forestales de esta área geográfica.

Návar-Cháidez, Rodríguez-Flores, y Domínguez-Caballero (2013, p.348), destaca que la ecuación más común reportada en la literatura científica es una función lineal logarítmica del diámetro normal del árbol, siendo esta una ecuación empírica donde sus coeficientes escalares no son conocidos y se estiman generalmente por procedimientos de regresión lineal, que estiman la biomasa en función de la gravedad específica de la madera y la altura del dosel, además del diámetro normal como variables independientes exógenas, el autor menciona otros procedimientos de determinación de biomasa, de carácter teórico basado en la teoría fractal de la distribución de recursos en los organismos vivos (West, Brown y Enquist, 1999, p.122).

2.6.3 Fijación de carbono.

El elemento carbono es el componente fundamental de todos los compuestos orgánicos, sin embargo, la cantidad de carbono es limitada, por lo que se recicla constantemente mediante la fijación del carbono atmosférico a través de los procesos de fotosíntesis de las plantas y su liberación por la respiración de estas. Se plantea que la vegetación terrestre, fundamentalmente de tipo forestal, y el suelo, son capaces de secuestrar unas 4.7 ± 1.6 Gt/año de carbono a nivel mundial (Gt, Giga toneladas), lo que representa una cantidad importante que detraer del conjunto de emisiones fósiles estimado en 8.7 ± 0.5 Gt/año y del carbono liberado en los procesos de deforestación (1.2 ± 0.7 Gt/año) (Le Quéré, et. al., 2009, pp. 1-2).

En las plantaciones forestales destinadas a la producción de madera el mayor porcentaje de biomasa aérea se concentra en el fuste del árbol y su capacidad de acumulación de carbono es influenciada principalmente por

factores físicos, edáficos y por patrones de disturbio que afectan la estructura comunitaria y las reservas de biomasa y carbono en los bosques tropicales (Vásquez y Arellano, 2012, p. 31).

Los bosques son, en general, sumideros netos de carbono debido a que la absorción de CO₂ atmosférico es mayor que el que se devuelve a la atmósfera a través de procesos como la respiración de la propia planta y la descomposición vegetal a través de bacterias, hongos, entre otros microorganismos. Según Hese *et al.*, (2005 p.99), alrededor del 90 % del carbono secuestrado por la vegetación es almacenado en los troncos de los árboles, en base a esto la silvicultura de plantaciones orienta su práctica a disminuir el volumen o peso de la fracción contenida en la copa del árbol, mediante el manejo de la competencia para inducir la eliminación de las ramas y eventualmente mediante podas de las partes bajas de la copa.

El balance entre el carbono acumulado en el árbol, como resultado de su crecimiento, y el liberado por el desprendimiento y descomposición de hojas, ramas, frutos, cortezas, entre otros componentes, determina la fijación neta de carbono por el árbol (Montero, Ruiz-Peinado y Muñoz, 2005 p.18).

A partir de la cuantificación de biomasa seca de una especie arbórea, se calcula la cantidad de carbono que almacenan, Kollmann (1959, p.137) indicaba que todas las maderas contienen, aproximadamente, un 50 % de carbono y la composición de la madera es similar en las distintas especies leñosas, así como también dentro de un mismo árbol, en sus diversas partes, esta aseveración también es aceptada por el IPCC (1996) y por varios autores que han encontrado que es la proporción de carbono contenido en cualquier especie vegetal. Callo (2001, p.6) y Fragoso (2003 p.42) utilizaron 0.45 (IPCC, 1996 párr. 9) recomienda el valor de 0.50 hasta tener valores precisos por especies.

El incremento en biomasa de los árboles y en el carbono almacenado en los ecosistemas forestales ante el aumento de la concentración atmosférica de CO₂, han sido, y son, objeto de continua atención experimental, focalizada en el incremento en la producción primaria neta, su duración y su reparto entre los posibles sumideros (Pardo, 2010, p.137; Fonseca, Benayas y Allice, 2011 p.2).

Para la estimación de biomasa se utilizan variables independientes como el diámetro del tronco del árbol y su densidad siendo así una alternativa para la mitigación del efecto de los gases invernaderos como lo evidencian en sus investigaciones Chou y Gutiérrez-Espeleta (2013); Douterlungne, Herrera, Ferguson, Siddique, y Soto (2013); Fonseca, Ruíz, Rojas, y Alice, (2013); Emanuelli, Milla, y Jiménez (2014); Ruiz, *et al.*, (2014).

Además, diversos autores coinciden en que los modelos son específicos para la especie arbórea y su edad (Solano, Vega, Eras, y Cueva, 2014; Cuéllar y Larrea-Alcázar, 2016; Domínguez-Calleros, Rodríguez-Flores y Návar, 2016; Jauregui-Valarezo 2016; López. 2017; Fonseca 2017; Barth, *et al.*, 2018).

La investigación en esta área de conocimientos sobre la producción, determinación de biomasa y fijación de carbono en los ecosistemas y especies forestal constituye una línea de investigación de gran desarrollo en las dos últimas décadas a nivel regional como se evidencia en las publicaciones de Schlegel, Gayoso, y Guerra, (2000); Schlegel, (2001); Montero *et al.*, (2005); Ibrahim *et al.* (2006); Segura, y Andrade, (2008); Domínguez, Aguirre, Jiménez, Rodríguez y Díaz (2009); Montes de Oca, García, Nájera y Méndez (2009).

2.7 Ecuaciones de estimación de volumen, biomasa y fijación de carbono para plantaciones de teca

La teca (*Tectona grandis* Linn. F.) es una de las principales especies exóticas utilizadas en los programas de reforestación en la región Costa de Ecuador, debido a su alta adaptabilidad a los ecosistemas locales y su alta demanda en el mercado de la madera, tanto a nivel nacional como internacional, dadas sus características estéticas, de trabajabilidad y durabilidad. Se reportan hasta el 2018, un total de 9 368.4 hectáreas de teca (MAG, Subsecretaria de Producción Forestal, 2018) fomentadas por el programa “Incentivos para la Forestación con Fines Comerciales” del Ministerio de Agricultura de Ecuador (MAGAP, 2015) iniciado a principios del 2013, aproximadamente el 40 % de la superficie total de plantaciones de todas las especies promovidas por este programa de gobierno.

De la revisión de las fuentes bibliográficas sobre modelos de volumen, biomasa, fijación de carbono elaborados para la especie teca destacan los trabajos publicados por Heredia (2003); Vásquez, (2011); Warner, *et al.*, (2016); sobre la construcción de ecuaciones de volumen, y resultados de investigación para la construcción de modelos alométricas para el cálculo de biomasa, fijación de carbono y otras variables relacionadas, destacan también las publicaciones de Jiménez y Landeta (2009); Vyas, Mehta, Dinakaran y Krishnayya (2010); Ounban, Puangchit, y Diloksumpun, (2016); López, Vaidez y Alvarado (2018) y Vincent (2018), se hace énfasis en los trabajos de Pérez y Kanninen (2005).

En resumen los esfuerzos de la investigación se orientan al desarrollo de metodologías para la cuantificación y monitoreo de la producción de biomasa y fijación de carbono de los diferentes ecosistemas forestales, tipologías de bosques y especies, constituyendo una activa línea de investigación el desarrollo de herramientas y procedimientos que incrementan la precisión y eficiencia en la estimación de parámetros estructurales de

masas forestales (densidad, biomasa, número de árboles por hectárea, altura de árboles, área basal, diversidad, y otros) como soporte para la toma de decisiones que ayuden a mejorar la gestión de los bosques y, en general de cualquier tipología de bosque (Ounban, Puangchit, y Diloksumpun, 2016).

2.8 Muestreo angular o método de Bitterlich

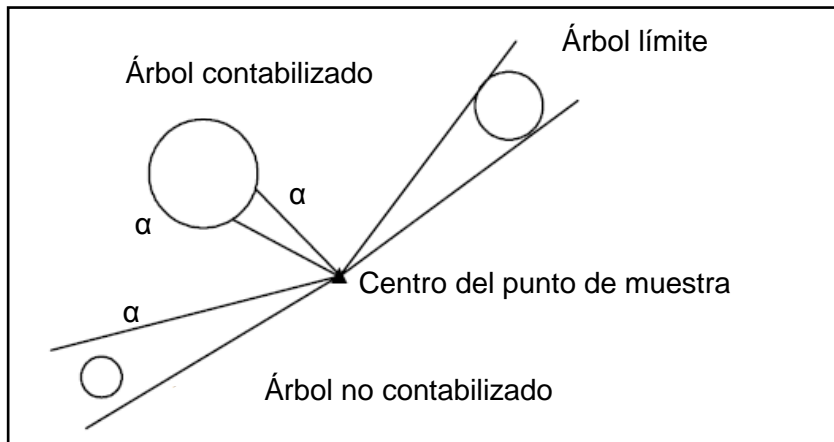
De acuerdo Lema (1979), el muestreo con probabilidades variables o muestreo con probabilidades proporcionales al tamaño (*PPS Probabality Proportional to Size*), fue elaborado por Hausen y Hurwitz en 1943, pero es el Dr. Bitterlich el que lo introduce al sector forestal a partir de 1947, ya en 1931, Bitterlich descubre la importancia del ángulo de visión bajo el cual la sección transversal de un árbol a la altura del pecho aparece cuando se mira desde cierto punto y en 1948 prueba la validez universal del Principio de Conteo por Ángulos que se podría enunciar:

“Contando desde un punto al azar aquellos árboles cuya sección transversal a la altura del pecho exceden cierto ángulo crítico se produce un estimador objetivo del área basal por hectárea”.

Esta técnica se conoce en la literatura de medición forestal como método Bitterlich, parcelas de superficie variable o de conteo angular (Bitterlich, 1984; Kershaw, 2014; Aldana, 2008), entre otros.

El Gráfico 1, ilustra el procedimiento de proceso de selección de los árboles que se incluyen en el conteo angular que son observados mediante un visor de ángulo fijo α desde el punto de muestreo.

Gráfico 1. Conteo de árboles por muestreo angular



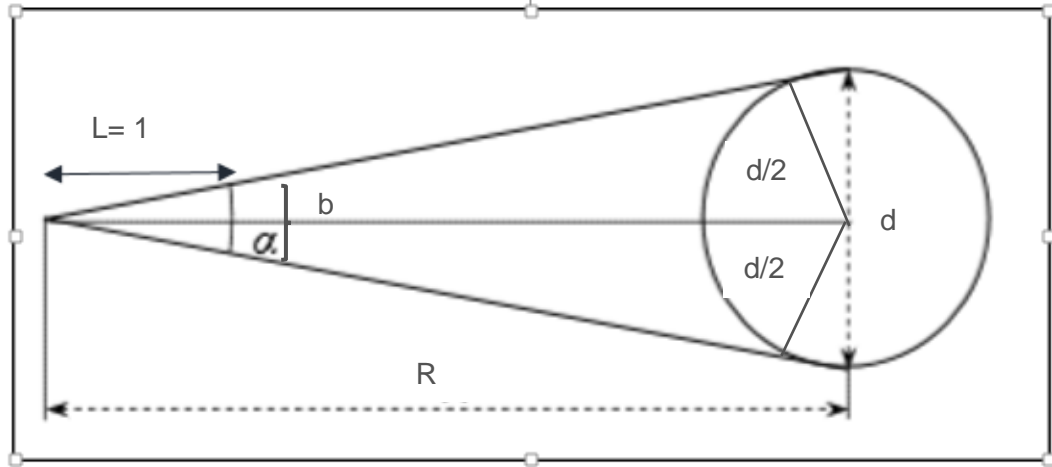
Fuente: Kershaw (2014)

2.8.1 Derivación del principio básico.

Para la fundamentación teórica de método se sigue al autor antes citado Lema, (1979):

Utilizando Una varilla de madera de longitud L , con una mira de longitud b fija en un extremo, se define un ángulo fijo mediante el cual es observado desde un punto de muestro el diámetro a 1.30 m de altura de los árboles mediante un giro de 360° , se demuestra que si la varilla tiene una longitud de $L= 1$ m y la mira una anchura de 2 cm, el DAP del árbol (d) puede estar localizado a una distancia no mayor de $50d$ de un punto cualquiera de observación y todavía puede ser contado, (Gráfico 2).

Gráfico 2. Principio básico del método.



Elaborado por: El autor

Relacionando el área basal del árbol de diámetro a 1.30 m, con el área de un círculo limitante de radio igual a su distancia al punto de muestreo, se obtiene:

$$\frac{\text{área basal árbol}}{\text{área círculo limitante}} = \frac{\frac{\pi}{4} d^2}{\pi R^2} = \frac{\pi d^2}{4\pi^2 \frac{d^2}{4\text{sen}^2 \frac{\alpha}{2}}} = \text{sen}^2 \frac{\alpha}{2}$$

$$\frac{\frac{\pi}{4} d^2}{1 \text{ Ha}} = \text{sen}^2 \frac{\alpha}{2} \text{ pero una Ha es } 10^4 \text{ m}^2$$

$$\text{Con lo cual el área de tales arboles será } \frac{\pi}{4} = 10^4 \text{ m}^2 \text{sen}^2 \frac{\alpha}{2}$$

$$\frac{\text{área basal árbol}}{\text{área círculo limitante}} = \frac{1 \text{ m}^2}{10,000 \text{ m}^2} = \frac{1 \text{ m}^2}{\text{Ha}} = \text{FAB}$$

Donde FAB es el factor de área basimétrica por el cual se multiplica el número de árboles contado para calcular el área basal por ha en el punto de muestreo.

Luego si se cuenta el número de árboles (nc), por ejemplo nc que hay en una vuelta completa o 360°, se producirá un estimado del área basal por hectárea (que se llamará G) de árboles que estén a la distancia R.

$$\text{con lo cual } \frac{G}{\text{Ha}} = 10^4 m^2 \text{sen}^2 \frac{\alpha}{2} \cdot nc = \text{FAB} \cdot nc$$

El factor FAB = $10^4 \text{sen}^2 \alpha/2$ en el cual el número de árboles tiene que ser multiplicado se llama factor de área basal.

El componente 10^4 del FAB, sirve para convertir el área basal estimada a m² por hectárea.

Para controlar el número de árboles que en promedio califican y que deben ser contados en un punto de la muestra, es preciso escoger varios ángulos críticos, o factores de área basimétrica.

2.9 Corrección por pendiente

El método Bitterlich está diseñado para visualizar los árboles en el plano de su proyección horizontal, si el terreno tiene pendiente habrá que corregir el ángulo de visualización por efecto de la misma, el instrumento inventado por (Bitterlich, 1980), el *Spiegel Relaskop*, automáticamente corrige el ángulo por efecto de la pendiente menciona que el relascopio tiene una corrección por pendiente integrada en forma de péndulo que permite disminuir o ampliar el ángulo dependiendo de la inclinación, pero si la medición fuese realizada simplemente con la regla Bitterlich se debe tomar en consideración la pendiente y corregir el ángulo.

Según Kershaw (2014, p. 374) para la corrección de la pendiente, primero se debe conocer el factor de área basimétrica específico con el que se está trabajando, de manera que para reducir el error por pendiente se

multiplica el FAB por el coseno de la pendiente con su ángulo de inclinación en grados.

En la investigación de Ståhl, Ringvall, H. Gove, J. Ducey, (2002), los que realizaron un cálculo para la corrección de pendiente de árboles cortados, donde utiliza dos tipos de corrección *Point relascope sampling (PRS)* y *Transect relascope sampling (TRS)*.

Para pendientes inferiores a un 24 % de inclinación la corrección sería despreciable en la elaboración de inventarios forestales, utilizando el método de muestreo angular.

3 MARCO METODOLÓGICO

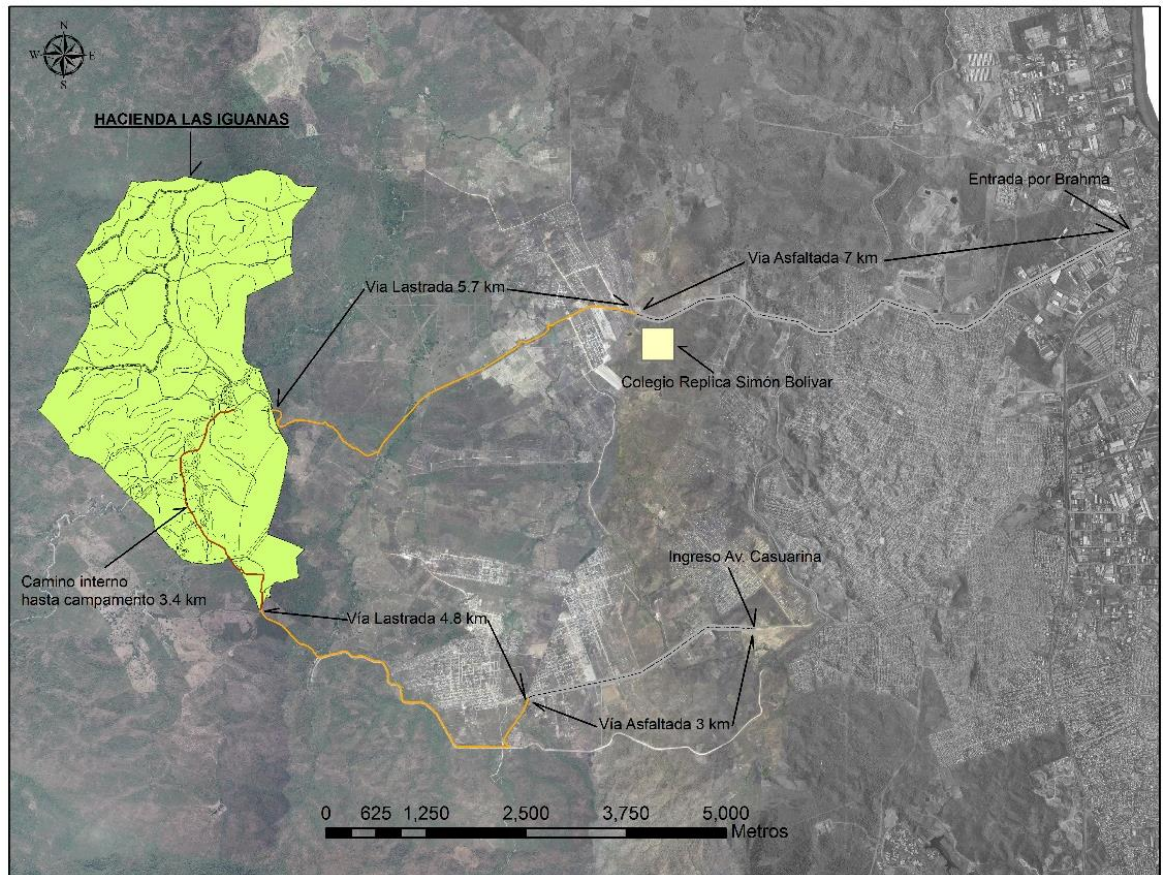
El presente Trabajo de Titulación tuvo un enfoque cuantitativo y un alcance descriptivo y correlacional, se desarrolló mediante un proceso investigativo no experimental utilizando técnicas de muestreo probabilísticas. Para la investigación se utilizaron los registros de información de campo de las parcelas de muestreo de las plantaciones de teca, objeto de estudio del proyecto institucional “Evaluación de tecnología de detección remota para la estimación de biomasa de Teca en la Región Costa del Ecuador” (Peñalver, Rivas, Triana, Díaz y Mora, 2018). El trabajo se orientó en la evaluación de alternativas de muestreo de mayor precisión y eficiencia para el inventario de plantaciones de teca con fines de manejo forestal y en particular para la estimación de biomasa aérea y secuestro de carbono atmosférico. El abordaje metodológico investigativo se realizó mediante la simulación en gabinete de procedimientos de muestreo estadístico.

3.1 Localización del área de estudio

La población objeto de estudio, fue una plantación de teca de la Región Costa del Ecuador, en la Provincia de Guayas, ubicada en el predio de nombre Morondava (ver Gráfico 3)

La plantación seleccionada para el estudio, se encuentra en la zona ecológica de Bosque seco Tropical a bosque Tropical Semihúmedo. El régimen de precipitación se caracteriza por ser unimodal, con un período lluvioso en el primer trimestre del año y una marcada sequía en el resto del año (INAHMI, 2017).

Gráfico 3. Ubicación geográfica del predio.



Fuente: Proyecto Institucional, 2018.

3.2 Muestreo forestal

En el proyecto de referencia establecieron parcelas circulares de superficie fija de 500 m² utilizando el muestreo simple aleatorio sin reemplazo. El número de parcelas se determinó considerando una intensidad de muestreo de 2 % (Tabla 1). En el Gráfico 4, se indican las ubicaciones de las parcelas mediante las coordenadas de sus centros obtenidas mediante procedimientos topográficos de precisión en el sistema WGS84 y proyección UTM 17S.

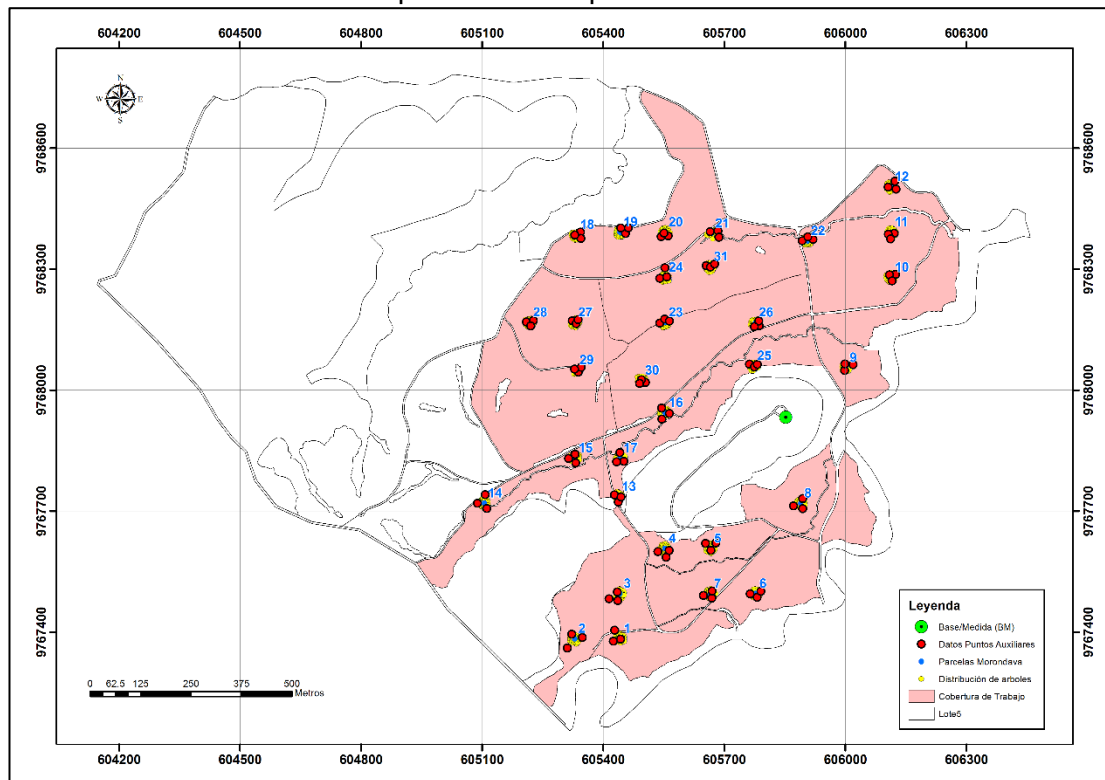
Tabla 1. Número de parcelas de muestreo

Plantación	Superficie (Ha)	Parcelas	I%
Morondava	78.3	31	2.0

Fuente: Proyecto institucional, 2018.

Elaborado por: El Autor.

Gráfico 4. Distribución de las parcelas en el predio Morondava



Fuente. Proyecto institucional 2018.

3.3 Medición de variables de árboles y parcelas

De acuerdo con el protocolo del proyecto de referencia, cada árbol perteneciente a una parcela de muestreo, se marcó y numeró con pintura, se registraron sus coordenadas GPS y se midieron sus variables dendrométricas, aplicando los procedimientos de medición y registro de datos propios de la Dasometría, ver Caillez (1981), Aldana (2008), Aldana et al. (1995); Pardé y Bouchon (1994) y Kershaw et al. (2016). Todos los símbolos de las variables dasométricas y sus definiciones corresponden a los establecidos por Soest *et al.* (1961). También se registró el tiempo, en minutos, de establecimiento de la unidad de muestreo y de medición de árboles.

Los resultados del inventario forestal de las plantaciones de teca se encuentran en Anexo 1, esta información constituye la data de contraste para

la evaluación de la precisión y eficiencia del método de muestreo que se propuso en la presente investigación.

Durante los trabajos de campo se incluyó la aplicación del método de Bitterlich para la estimación del área basal por hectárea haciendo centro en cada parcela de superficie fija, se utilizó un Factor de Área Basimétrica, $FAB=1$, y se registró el tiempo de ejecución del control, los datos generados mediante esta técnica de muestreo constituyen también una data de validación para el contraste de las variantes del método de muestreo angular que se prueba en la investigación. La ejecución en campo del procedimiento se explica seguidamente:

Se hizo centro en cada parcela de superficie fija y usando una variación del instrumento Regla o Relascopio de Bitterlich, con medidas de 50 cm de longitud y apertura angular de un cm, $FAB=1$, se observa cada árbol de manera que se incluyen en la muestra aquellos árboles que sobrepasen el ángulo de apertura del instrumento, los que se registran como uno y los árboles que no estén dentro de la apertura se anotan como cero, esto es, no se incluye en la muestra, los árboles que se aprecien en el límite de la apertura se registran como 0.5. La sumatoria de todos estos registros equivale a la estimación del área basal por hectárea en el punto de muestreo (m^2/ha). De igual manera que para la parcela circular de área fija se registraron los tiempos, en minutos, de ejecución del procedimiento.

3.4 Simulación del muestreo angular

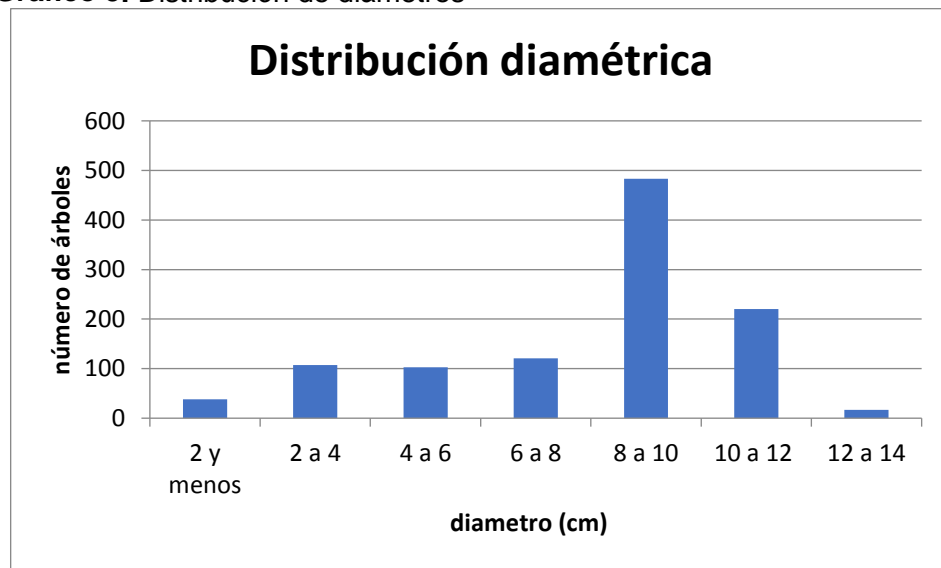
A partir de la georreferenciación de cada árbol en la parcela circular de área fija de $500 m^2$, por sus coordenadas planimétricas UTM y las coordenadas del centro de la parcela; se simula la selección de los árboles, con probabilidad proporcional al tamaño, de acuerdo con el fundamento teórico del método de Bitterlich. Para este efecto se programó un algoritmo de cálculo, en el tabulador electrónico Excel, en un sistema de coordenadas cartesianas donde cada árbol está referenciado de acuerdo a su posición en

X y Y en el plano georreferenciado de la parcela, ver (Gráfico 6), mediante este algoritmo se calculó la distancia del centro de la parcela a cada árbol dentro de la unidad de muestreo.

Para un FAB dado se calculó la distancia crítica que corresponde a árbol y se comparó con su distancia horizontal al centro de la parcela, si esta distancia es menor que la distancia crítica se incluyó al árbol en el conteo. Para este estudio y de acuerdo al rango de diámetros encontrados en las plantaciones, (Ver Gráfico 5) se escogieron los FAB 0.5, 1, 1.5 y 2.

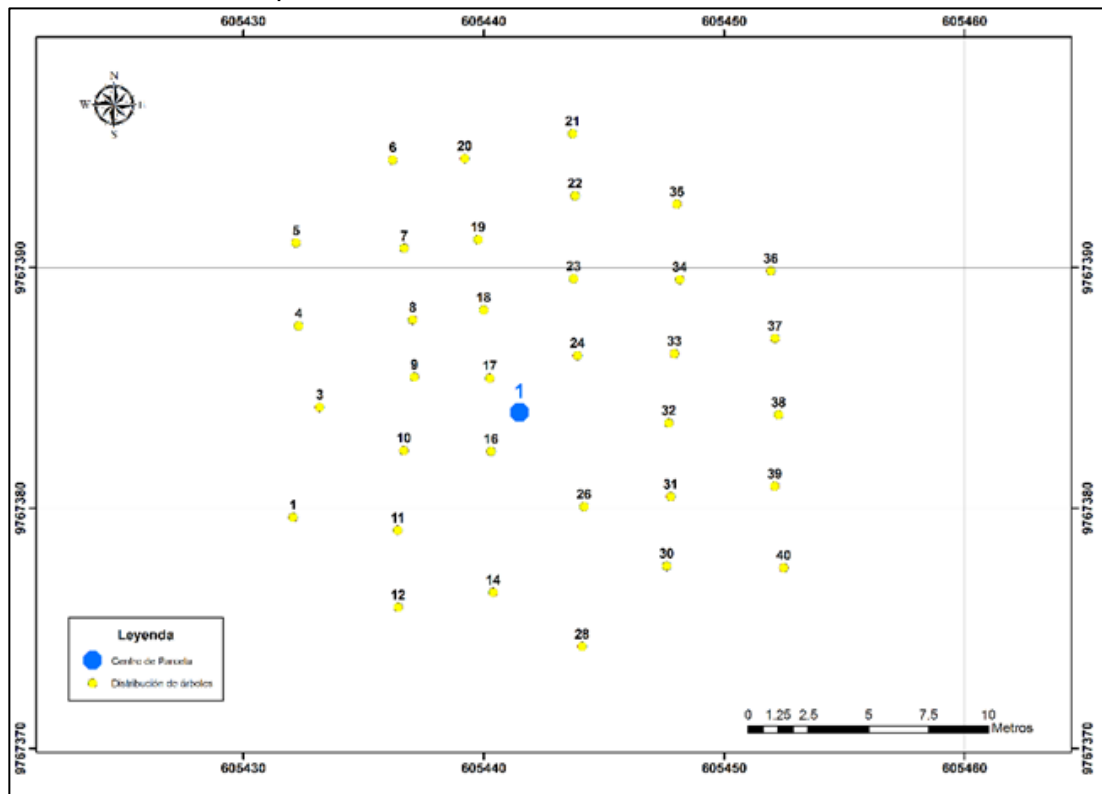
El mayor valor de diámetro medido en la plantación fue de 14 cm, no esperándose encontrar diámetros mayores a este, de manera que no habría posibilidad de encontrar árboles con diámetros incluibles en los FAB considerados a mayor distancia del centro de la parcela de radio 12.64 m, ejemplo para un diámetro de 14 cm la distancia crítica para un FAB 0.5 es de 9.89 m que sería el factor de área basimétrica que incluiría arboles a mayor distancia.

Gráfico 5. Distribución de diámetros



Elaborado por: El Autor.

Gráfico 6. Plano de parcela con coordenadas



Fuente: Proyecto institucional 2018.

En siguiente Gráfico se muestra una ilustración de la parcela circular incluido el conteo de árboles del muestreo angular

Gráfico 7. Parcela circular de 500 m²



Elaborado por: El Autor.

3.5 Variables seleccionadas para el contraste de muestreo

Para la evaluación de la precisión y eficiencia del método de muestreo angular propuesto para la estimación de los indicadores dasométricos, estructurales, de producción de biomasa, fijación de carbono y secuestro de dióxido de carbono atmosférico de las plantaciones de teca objeto de estudio se han seleccionado las variables dasométricas que se indican en la Tabla 3, las estimaciones hechas mediante los Factores de Área Basimétrica escogidos para la simulación del muestreo angular se comparan con las estimaciones de las parcelas de superficie fija y las parcelas de muestreo angular aplicada en campo, que aportan la información de control o testigo.

Tabla 2. Variables Dasométricas

Variable	Símbolo	Definición	Unidad medida
Número de árboles actual	Na	Equivalente para una hectárea del número de árboles con diámetro 1.3 m (n) en la parcela.	Cantidad
Diámetro del árbol de área basal media	dg	Diámetro correspondiente al promedio del área basal de los árboles en la parcela	cm
Área basal total	G	Suma de las áreas de las secciones transversales de los árboles en la parcela, correspondientes al diámetro normal.	m ² /ha
Altura promedio de Lorey	hL	Altura promedio ponderada por el área basal de cada árbol en la	m
Volumen total	V	Suma de los volúmenes de los troncos de los árboles, desde el nivel del suelo hasta el ápice terminal, calculado por la fórmula de Lara (2011).	m ³ /ha
Biomasa	B	Peso seco de la biomasa aérea, calculado por la fórmula de Pérez y Kanninen (2003)	t/ha

...continua pág. 35

...viene pág. 34

Dióxido de carbono	CO ₂	Dióxido de carbono atmosférico fijado en la biomasa aérea, calculado por la fórmula de IPCC (1996)	t/ha
Carbono	C	Carbono en la biomasa aérea, calculado por la relación C=3.67*C (Montero et al.,2005)	t/ha

Fuente: Proyecto institucional 2018.

En el apartado de resultados se usan los siguientes símbolos expresados en la siguiente Tabla:

Tabla 3. Simbología expresada en los resultados

Símbolo	Variable	Definición
n	número de arboles	número de parcelas contadas para la muestra
nc	número contado	número contado en simulación en cada tratamiento
M	media	media aritmética o promedio de cada tratamiento
DE	desviación estándar	valor de dispersión con respecto a la media
CV (%)	coeficiente de variación	variación en porcentaje
E	error probabilístico	cantidad de error de muestro por variable
E (%)	error porcentual	error expresado en porcentaje
t	tiempo	tiempo en el que tarda cada tratamiento en ser ejecutado
e	eficiencia	productividad en la que se realiza cada variable por tratamiento

Elaborado por: El Autor.

3.6 Procesamiento de datos y análisis estadístico

Los datos generados mediante la simulación del muestreo angular con los diferentes FAB estudiados fueron procesados mediante el tabulador electrónico Excel se calcularán las medidas de tendencia central, de

dispersión de las variables y de precisión, error de muestreo para un nivel de significación $\alpha = 0.05$. Mediante el paquete estadístico INFOSTAT se aplica el ANOVA, modelo de clasificación simple, para el contraste de las diferencias de medias de las variables objeto de análisis asumiendo una completa aleatorización de las unidades de muestreo, se aplicaron pruebas a posteriori de Tukey para el análisis de las diferencias entre los promedios y se comprobaran los supuestos teóricos del análisis estadístico mediante análisis gráfico de los residuos, las pruebas se aplicaran para un nivel de significación $\alpha = 0.05$. Se considerarán como tratamiento los diferentes métodos de muestreo que se contrastan:

1. Testigo: parcela de superficie fija circular (PC)
2. Testigo: Parcela de superficie variable de campo. FAB 1 (BC)
3. Método 1: Parcela de superficie variable de simulación. FAB= 0.5 (S0.5)
4. Método 2: Parcela de superficie variable de simulación. FAB= 1 (S1)
5. Método 3: Parcela de superficie variable de simulación. FAB=1.5 (S1.5)
6. Método 4: Parcela de superficie variable de simulación FAB=2 (S2)

La validez interna del diseño de la investigación se asegura con la aleatorización del muestreo de campo aplicado en las plantaciones de Teca objeto de estudio de acuerdo a los indicadores de precisión estadística considerados en el proyecto institucional, 15 % de error de muestreo en la estimación del promedio poblacional de la variable Biomasa por ha (B), para el nivel de significación estadístico antes indicado, 0.05, y a los efectos del presente trabajo se prefija igual error de muestreo para la variable Área basal por ha (G).

Mediante el contraste de los resultados de esta investigación con los reportes de la literatura científica publicados por otros autores se validaron los resultados obtenidos.

3.7 Evaluación de la eficiencia relativa del método de Bitterlich

Para la evaluación de la eficiencia relativa del método de Bitterlich con relación a el muestreo forestal utilizando parcelas de superficie fija se sigue el procedimiento descrito por (Kershaw 2016, p. 304).

$$e = \frac{(S_X)_1^2 t_1}{2a(S_X)_2^2 t_2}$$

Donde:

$s_x 1$ = error estándar en porcentaje para una unidad de muestreo como base de comparación

$s_x 2$ = error estándar en porcentaje para la otra unidad de muestreo a comparar

t_1 = costo o tiempo para la unidad de muestreo base

t_2 = costo o tiempo para la unidad de muestreo comparada

En esta ecuación no se consideran los tiempos de traslado entre unidades de muestreo.

La ecuación da la eficiencia de la unidad de muestreo 2, relativa a la unidad de muestreo 1. Si e , es menos de 1, entonces la unidad de muestreo 1 es más eficiente que la unidad de muestreo 2 y viceversa.

4 RESULTADOS Y DISCUSIÓN

Las Tablas siguientes 4, 5, 6, 7, 8, 9, 10 y 11 contienen los estadísticos de tendencia central, precisión y eficiencia para cada método (tratamiento) y variable considerada en el estudio, y el cálculo de la eficiencia relativa con respecto a la parcela de superficie fija levantada en campo.

Tabla 4. Variable Área basal por hectárea

Medidas	PC	BC	S (0.5)	S (1)	S (1.5)	S (2)
n	21	21	21	21	21	21
Nc	37	5	9	5	3	2
G	4.1	4.7	4.7	4.6	4.6	4.8
DE	1.26	1.44	1.66	1.63	1.54	1.61
CV (%)	30.7 %	30.8 %	35.6 %	35.7 %	33.6 %	33.8 %
E	0.3	0.3	0.4	0.4	0.3	0.4
SE (%)	6.7 %	6.7 %	7.8 %	7.8 %	7.3 %	7.4 %
t	36	5	10	5	5	4
e	1	7.13	2.67	5.32	6	7.4

Elaborado por: El Autor

Nota: La letra (n) es el número de parcelas, (nc) número de árboles contados, (CV) coeficiente de variación; (E) error; (t) tiempo y (e) eficiencia relativa. Tratamientos: PC, parcela circular campo, BC, parcela muestreo angular campo, S(0.5), S(1), S(1.5) Y S(2) parcelas de muestreo angular simuladas, BAF 0.5, 1, 1.5 Y 2 respectivamente.

En la Tabla anterior se reflejan los resultados de la variable área basal (G), donde se pueden apreciar las medidas de tendencia central y de dispersión además de la estimación de la eficiencia.

Tabla 5. Variable Número de árboles por hectárea

Medidas	PC	BC	S (0.5)	S (1)	S (1.5)	S (2)
n	21	21	21	21	21	21
Nc	37	5	9	5	3	2
Na	736.2	797.8	815.2	886.9	807.8	890.9
DE	83.81	192.27	192.90	390.51	285.81	431.74
CV (%)	11.4 %	24.1 %	23.7 %	44.0 %	35.4 %	48.5 %
E	18.3	42.0	42.1	85.2	62.4	94.2
SE (%)	2.5 %	5.3 %	5.2 %	9.6 %	7.7 %	10.6 %
t	15	8	14	7.5	6	5
e	1	0.42	0.25	0.13	0.26	0.17

Elaborado por: El Autor

Nota: La letra (gn) es el número de parcelas, (nc) número de árboles contados, (CV) coeficiente de variación; (E) error; (t) tiempo y (e) eficiencia relativa. Tratamientos: PC, parcela circular campo, BC, parcela muestreo angular campo, S(0.5), S(1), S(1.5) Y S(2) parcelas de muestreo angular simuladas, BAF 0.5, 1, 1.5 Y 2 respectivamente.

En la variable número de árboles (N) se obtuvieron los resultados que se presentan en la Tabla anterior conociendo los valores de medidas de tendencia central y dispersión además de su eficiencia relativa.

Tabla 6. Variable Diámetro promedio

Medidas	PC	BC	S (0.5)	S (1)	S (1.5)	S (2)
n	21	21	21	21	21	21
nc	37	5	9	5	3	2
dg	7.9	8.7	8.5	8.8	8.8	9.1
DE	1.32	1.49	1.57	1.89	1.86	2.46
CV (%)	16.8 %	17.2 %	18.5 %	21.4 %	21.1 %	27.1 %
E	0.3	0.3	0.3	0.4	0.4	0.5
E (%)	3.7 %	3.7 %	4.0 %	4.7 %	4.6 %	5.9 %
t	36	8	20	8	7	5.5
e	1	4.31	1.48	2.78	3.26	2.5

Elaborado por: El autor

Nota: La letra (n) es el número de parcelas, (nc) número de árboles contados, (CV) coeficiente de variación; (E) error; (t) tiempo y (e) eficiencia relativa. Tratamientos: PC, parcela circular campo, BC, parcela muestreo angular campo, S(0.5), S(1), S(1.5) Y S(2) parcelas de muestreo angular simuladas, BAF 0.5, 1, 1.5 Y 2 respectivamente.

En la Tabla anterior se reflejan los resultados de la variable diámetro promedio (dg), donde se pueden apreciar las medidas de tendencia central y de dispersión además de la estimación de la eficiencia.

Tabla 7. Variable Altura promedio por árbol

Medidas	PC	BC	S (0.5)	S (1)	S (1.5)	S (2)
n	21	21	21	21	21	21
nc	37	5	9	5	3	2
h	8.0	8.3	8.2	8.1	8.1	8.1
DE	1.32	1.16	1.33	1.39	1.42	1.39
CV (%)	16.4 %	13.9 %	16.3 %	17.1 %	17.5 %	17.2 %
E	0.3	0.3	0.3	0.3	0.3	0.3
E (%)	3.6 %	3.0 %	3.6 %	3.7 %	3.8 %	3.8 %
t	80	15	25	14	9	7
e	1	7.43	3.26	5.31	7.88	10.46

Elaborado por: El autor

Nota: La letra (n) es el número de parcelas, (nc) número de árboles contados, (CV) coeficiente de variación; (E) error; (t) tiempo y (e) eficiencia relativa. Tratamientos: PC, parcela circular campo, BC, parcela muestreo angular campo, S(0.5), S(1), S(1.5) Y S(2) parcelas de muestreo angular simuladas, BAF 0.5, 1, 1.5 Y 2 respectivamente.

En la variable altura de planta (hL) se obtuvieron los resultados que se presentan en la Tabla anterior conociendo los valores de medidas de tendencia central y dispersión además de su eficiencia relativa.

Tabla 8. Variable Volumen por hectárea

Medidas	PC	BC	S (0.5)	S (1)	S (1.5)	S (2)
n	21	21	21	21	21	21
nc	37	5	9	5	3	2
V	22.4	25.5	25.5	24.7	24.9	25.7
DE	7.85	8.61	10.20	9.81	9.58	9.56
CV (%)	35.0 %	33.8 %	40.0 %	39.7 %	38.4 %	37.2 %
E	1.7	1.9	2.2	2.1	2.1	2.1
E (%)	7.6 %	7.4 %	8.7 %	8.7 %	8.4 %	8.1 %
t	101	16	26.5	16	9	8
e	1	6.76	2.92	4.9	9.31	11.14

Elaborado por: El autor

Nota: La letra (n) es el número de parcelas, (nc) número de árboles contados, (CV) coeficiente de variación; (E) error; (t) tiempo y (e) eficiencia relativa. Tratamientos: PC, parcela circular campo, BC, parcela muestreo angular campo, S(0.5), S(1), S(1.5) Y S(2) parcelas de muestreo angular simuladas, BAF 0.5, 1, 1.5 Y 2 respectivamente.

En la Tabla anterior se reflejan los resultados de la variable Volumen (V), donde se pueden apreciar las medidas de tendencia central y de dispersión además de la estimación de la eficiencia.

Tabla 9. Variable Biomasa

Medidas	PC	BC	S (0.5)	S (1)	S (1.5)	S (2)
n	21	21	21	21	21	21
nc	37	5	9	5	3	2
B	18.8	40.0	21.4	20.8	20.6	21.4
DE	10.20	10.20	8.45	7.80	7.60	7.42
CV (%)	54.4 %	25.5 %	39.5 %	37.5 %	36.8 %	34.6 %
E	2.2	2.2	1.8	1.7	1.7	1.6
E (%)	11.9 %	5.6 %	8.6 %	8.2 %	8.0 %	7.6 %
t	36	8	20	8	7	5.5
e	1	20.43	3,40	9.46	11.22	16.14

Elaborado por: El autor

Nota: La letra (n) es el número de parcelas, (nc) número de árboles contados, (CV) coeficiente de variación; (E) error; (t) tiempo y (e) eficiencia relativa. Tratamientos: PC, parcela circular campo, BC, parcela muestreo angular campo, S(0.5), S(1), S(1.5) Y S(2) parcelas de muestreo angular simuladas, BAF 0.5, 1, 1.5 Y 2 respectivamente.

En la variable Biomasa (B) se obtuvieron los resultados que se presentan en la Tabla anterior conociendo los valores de medidas de tendencia central y dispersión además de su eficiencia relativa.

Tabla 10. Variable Carbono contenido en biomasa.

Medidas	PC	BC	S (0.5)	S (1)	S (1.5)	S (2)
n	21	21	21	21	21	21
nc	37	5	9	5	3	2
C	9.4	19.3	10.6	10.3	10.3	10.7
DE	3.17	4.39	4.04	3.90	3.89	3.71
CV (%)	33.8 %	22.8 %	38.1 %	37.8 %	37.9 %	34.5 %
E	0.7	1.0	0.9	0.9	0.8	0.8
E (%)	7.4 %	5.0 %	8.3 %	8.2 %	8.3 %	7.5 %
t	36	8	20	8	7	5.5
e	1	9.88	1.41	3.6	4.09	6.25

Elaborado por: El autor

Nota: La letra (n) es el número de parcelas, (nc) número de árboles contados, (CV) coeficiente de variación; (E) error; (t) tiempo y (e) eficiencia relativa. Tratamientos: PC, parcela circular campo, BC, parcela muestreo angular campo, S(0.5), S(1), S(1.5) Y S(2) parcelas de muestreo angular simuladas, BAF 0.5, 1, 1.5 Y 2 respectivamente.

En la Tabla anterior se reflejan los resultados de la variable Carbono (C), donde se pueden apreciar las medidas de tendencia central y de dispersión además de la estimación de la eficiencia.

Tabla 11. Variable Fijación de Dióxido de Carbono (CO₂)

Medidas	PC	BC	S (0.5)	S (1)	S (1.5)	S (2)
n	21	21	21	21	21	21
nc	37	5	9	5	3	2
CO ₂	34.4	73.3	38.9	37.9	37.9	39.3
DE	11.62	8.68	14.82	14.32	13.95	13.63
CV (%)	33.8 %	11.8 %	38.1 %	37.7 %	36.8 %	34.7 %
E	2.5	1.9	3.2	3.1	3.0	3.0
E (%)	7.4 %	2.6 %	8.3 %	8.2 %	8.0 %	7.6 %
T	36	8	20	8	7	5.5
E	1	36.58	1.41	3.6	4.32	6.19

Elaborado por: El autor

Nota: La letra (n) es el número de parcelas, (nc) número de árboles contados, (CV) coeficiente de variación; (E) error; (t) tiempo y (e) eficiencia relativa. Tratamientos: PC, parcela circular campo, BC, parcela muestreo angular campo, S(0.5), S(1), S(1.5) Y S(2) parcelas de muestreo angular simuladas, BAF 0.5, 1, 1.5 Y 2 respectivamente.

En la variable Dióxido de Carbono (CO₂) se obtuvieron los resultados que se presentan en la Tabla anterior conociendo los valores de medidas de tendencia central y dispersión además de su eficiencia relativa.

En los siguientes Gráficos se analiza la precisión y eficiencia de los resultados conglomerados, aplicado a todas sus variables en los diferentes métodos.

Gráfico 8. Gráfico radial de la precisión en todos los métodos calculados

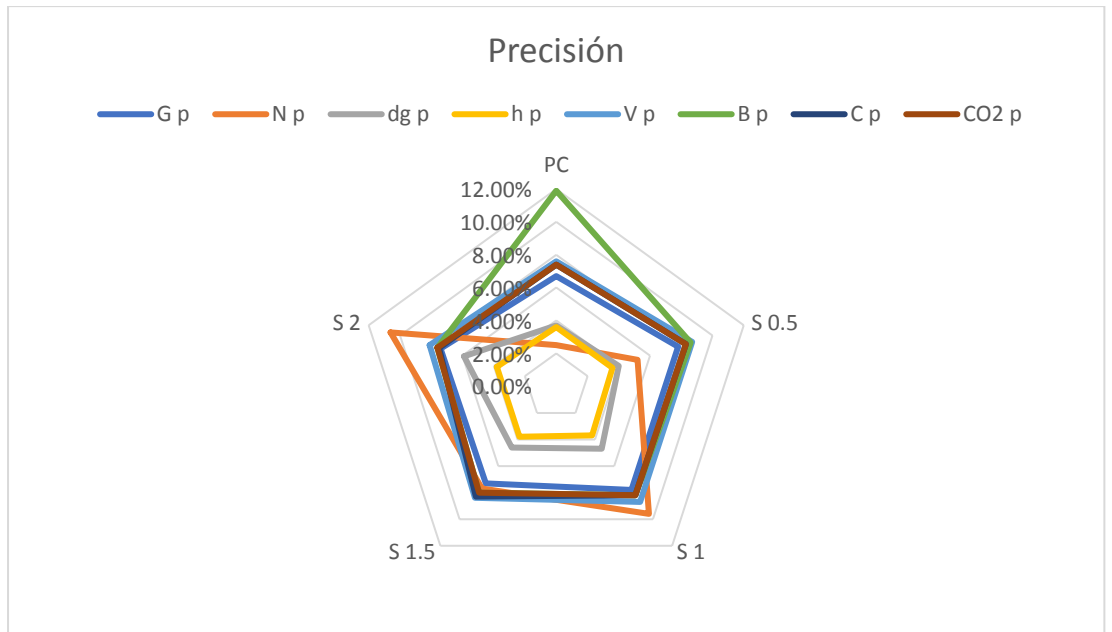
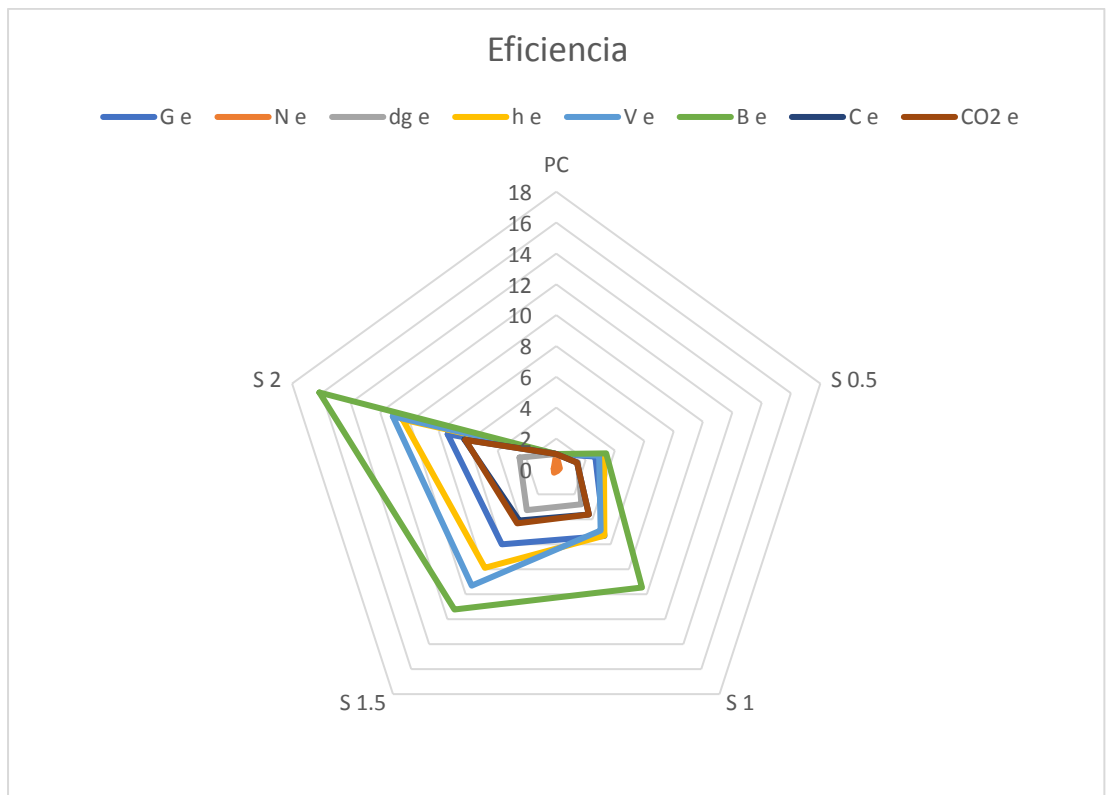


Gráfico 9. Gráfico radial de la eficiencia en todos los métodos calculados



El error porcentual en todas las variables estudiadas y comparadas por los diferentes métodos no sobrepasa el 15 %, como lo indica la metodología; además se da a conocer todas las medidas de tendencia central y de dispersión en cada variable expuesta en la investigación.

El ANOVA no detectó diferencias entre promedios por tratamientos, métodos, para ninguna de las variables consideradas al nivel de significación $\alpha=0.5$, de igual manera el análisis de la eficiencia relativa, evidencia que el método de conteo angular es más eficiente, excepto para la estimación de la variable número de árboles por hectárea donde la parcela circular de superficie fija es más eficiente, similar resultado encuentran Do Couto, Bastos, y de Lacerda, (1993), en Brasil, realizan una prueba del método angular en plantaciones de *Eucalyptus saligna* evaluando los factores de área basimétrica 2, 3 y 4 versus parcela de área fija y concluyen que las estimaciones de diámetro cuadrático y altura promedio fueron significativamente diferentes, no así entre estimaciones de área basal por hectárea (G), sin embargo los resultados obtenidos en la presente investigación concuerdan con los Farias, Soares, Souza de y Leite, (2002), que comparan estimaciones de índices dasométricos en bosque natural tropical en Brasil usando FAB de 2, 3 y 4 sin diferencias para ninguno de los métodos en área basal, volumen, diámetro y altura promedio; si encontraron diferencias para la variable número de árboles por hectárea, los resultados obtenidos en la presente investigación también coinciden con los obtenidos por Druszcz, Nakajima, Péllico Netto y Yoshitani. (2010), que realizan la comparación de los métodos de conteo angular en plantaciones de *Pinus taeda* L., Y también concuerda con Lionjanga y Pereira (2014), quienes prueban el método de conteo angular utilizando factores de área basimétrica 1, 2 y 4, en plantaciones de *Pinus patula* en la región de Chianga en Angola, África, excepto para el número de árboles por hectárea donde al conteo angular resulto menos preciso.

Šmelko, (2013), realizó un estudio evaluando métodos de muestreo angular utilizando simulación computarizada, encontrando que la precisión es similar entre los métodos y que la eficiencia es un 40 a 55 % para el método Bitterlich concordando con esta investigación, de igual manera. Rice, Weiskittel y Wagner (2014) evidencian que el método de muestreo angular es más preciso y eficiente, por su parte Gove (2017) también en un estudio de evaluación de métodos de muestreo mediante simulación computarizada comparando el muestro angular y la parcela de superficie fija, concluyen que el primero es el más eficiente método de estimación del volumen por hectárea de todos los probados, recientes resultados de Mulyana, Rohman y Purwanto (2018) que aplican el método de conteo angular en bosques comunitarios de la India con un FAB 1 para la estimación del área basal por hectárea y contrastan con el censo todos los árboles concluyen que no hay diferencias significativas.

El método de muestreo mediante parcelas de conteo angular o método de Bitterlich consistentemente ha demostrado desde su creación ser, al menos, tan preciso como los métodos que emplean parcelas de superficie fija y más eficiente para la estimación de importantes variables dasométricas como el área basal y el volumen por unidad de superficie, con excepción de la estimación del número de árboles por hectárea que por la naturaleza del método resulta ser más eficiente mediante el conteo de árboles en unidades de muestra de superficie fija.

Los resultados obtenidos han demostrado que el método de conteo angular es suficientemente preciso para la estimación de las principales variables dasométricas de plantaciones jóvenes de teca y tiene una superior eficiencia lo que lo hace preferible dados los altos valores de costos de trabajos de campo involucrados en los inventarios forestales.

5 CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES

5.1 Conclusiones

- Se aplicó el método de muestreo angular mediante simulación para los distintos factores de área basimétrica expuestos en el trabajo
- Se contrastó la precisión en los distintos métodos con sus respectivas variables en donde el ANOVA no demostró diferencias significativas para ninguno de ellos.
- Se evaluó la eficiencia relativa por método en las variables dasométricas, obteniendo que el Factor 2 es el más eficiente para la elaboración de un inventario forestal.

5.2 Recomendaciones

Se recomienda la implementación del método de muestreo angular para el inventario forestal de plantación de teca características similares a las estudiadas en el presente trabajo con el factor de área basimétrica dos, con distribución diamétrica similar a la plantación estudiada.

BIBLIOGRAFÍA

- Aldana, E., Frías, M., Peñalver, A., y Ares, A. E. (1995). Manual de dasometría. Obtenido de Editorial Félix Varela.
- Aldana, C. E. (2008). Medición Forestal. Obtenido de http://www.ipcinfo.org/fileadmin/user_upload/training_material/docs/MedF%2520Medici%25c3%25b3n%2520Forestal.pdf
- Alder, D. (1980). Estimación del volumen forestal y predicción del rendimiento, con referencia especial a los trópicos (No. CIDAB-SD391-F6e-22/2). Obtenido de Organización de las Naciones Unidas para la Agricultura y la Alimentación.
- Anuchin, N. P. (1970). Forest mensuration (Lesnaya Taksasiya). Obtenido de Israel Program, Forest Scientific Translation, Jerusalem.
- Barth, S. R., Boca, T., Giménez, A. M., Joseau, M. J., Gauchat, M. E., y Fassola, H. E. (2018). Estimación de biomasa aérea de *Grevillea robusta* A. implantada en la provincia de Misiones, Argentina. Obtenido de RIA. Vol. 44. (1), 30-40.
- Bitterlich, W. (1952). Die winkelzählprobe. Obtenido de Forstwissenschaftliches Centralblatt, 71(7-8), 215-225.
- Bitterlich, W. (1984). The relascope idea. Relative measurements in forestry.
- Bravo, F., Rivas, J. C., Monreal, J. A., y Ordóñez, A. C. (2005). BASIFOR 2.0: Programa informático para manejar los datos del Inventario Forestal Nacional 4 Congreso Forestal Español. Obtenido de La ciencia forestal: Respuestas para la sostenibilidad Ed. Sociedad Española de Ciencias Forestales.

- Brown, S. (1997). Estimating biomass and biomass change of tropical forests. . Obtenido de A primer. FAO Roma. Forestry Paper 135.
- Burga, R., Ríos, R., Tello, R., Urquiza, J. D., y del Castillo, D. M. (2010). Tamaño óptimo de la unidad muestral para inventarios forestales en el sector Caballococha - Palo Seco - Buen Suceso, provincia de Mariscal Ramón Castilla, Loreto, Perú. Obtenido de Vol. 1. (1), 49-56.
- Burkhardt, H. E. (2008). Remembering Walter Bitterlich. Obtenido de Journal of Forestry. Vol. 106. (2), Pag. 61.
- Caillez, F. (1980). Estimación del volumen forestal y predicción del rendimiento; estimación del volumen. Obtenido de Roma, FAO.
- Cailliez, M. D. (1981). Etude et interprétation statistique du profil protéique et immunologique dans la trypanosomose africaine humaine (Doctoral dissertation).
- Callo, C. D. (2001). Cuantificación de carbono secuestrado por algunos sistemas agroforestales y testigos en tres pisos ecológicos de la amazonia del Perú. Obtenido de (Doctoral dissertation, Tesis Maestría en Ciencias. Universidad Autónoma Chapingo. Chapingo Méx).
- Campelo-de Santana, S. H. (2014). Estudio de biomasa forestal a través de herramientas de teledetección. Obtenido de Tesis de Masterado. Universidad de Valladolid.
- Chou, S. W., y Gutiérrez-Espeleta, E. E. (2013). Ecuación para estimar la biomasa arbórea en los bosques tropicales de Costa Rica. Obtenido de Tecnología en Marcha. Vol. 26, N° 2. Pág 41-54.
- Cochran, W. G. (1977). Sampling Techniques: 3d Ed. New York: Wiley.

- Cuéllar, S., y Larrea-Alcázar, D. M. (2016). Pérdida de carbono por deforestación reciente (2010-2013) en las tierras bajas y Yungas de Bolivia. Obtenido de *Ecología en Bolivia*, 51(1), 15–25.
- De Farias, C. A., Soares, C. P. B., de Souza, A. L., & Leite, H. G. (2002). Comparação de métodos de amostragem para análise estrutural de florestas inequidistantes. *Rev. Árvore*, 26(5).
- Diéguez-Aranda, U., Alboreca, A. R., Castedo-Dorado, F., González, J. Á., Barrio-Anta, M., Crecente-Campo, F. y Balboa-Murias, M. A. (2009). Herramientas selvícolas para la gestión forestal sostenible en Galicia. *Forestry*, 82, 1-16.
- Do Couto, H. T. Z., Bastos, N. L. M., & de Lacerda, J. S. (1993). A amostragem por pontos na estimativa de área basal em povoamentos de *Eucalyptus*.
- Domingo, D., Lamelas-Gracia, M. T., Montealegre-Gracia, A. L., y de la Riva-Fernández, J. (2017). Comparison of regression models to estimate biomass losses and CO₂ emissions using lowdensity airborne laser scanning data in a burnt Aleppo pine forest. Obtenido de *European Journal of Remote Sensing*. Vol. 50. (1), 384–396.
- Domínguez-Cabrera, G., Aguirre-Calderón, O. A., Jiménez-Pérez, J., Rodríguez-Laguna, R., y Díaz-Balderas, J. A. (2009). Biomasa aérea y factores de expansión de especies arbóreas en bosques del sur de Nuevo León. Obtenido de *Revista Chapingo Serie Ciencias Forestales y del Ambiente*. Vol. 15. (1), 59-64.

- Domínguez-Calleros, P., Rodríguez-Flores, F., y Návar, J. (2016). Fitting and testing allometric equations for Mexico's sinaloan tropical dry trees and forest inventory plots. Obtenido de *Tropical and Subtropical Agroecosystems*, 19(1), 1-10.
- Douterlungne, D., Herrera-Gorocica, A. M., Ferguson, B. G., Siddique, I., y Soto-Pinto, L. (2013). Ecuaciones alométricas para estimar biomasa y carbono de cuatro especies leñosas neotropicales con potencial para la restauración. Obtenido de *Agrociencia*. Vol. 47, (4), 385-397.
- Druszcz, J. P., Nakajima, N. Y., Netto, S. P., & Júnior, M. Y. (2010). Comparação entre os métodos de amostragem de Bitterlich e de área fixa com parcela circular em plantação de *Pinus taeda*. *Floresta*, 40(4).
- Emanuelli, P., Milla, F., y Jiménez, A. (2014). Bases Técnicas para la Construcción de Funciones Alométricas de volumen y biomasa en Centro América y República Dominicana. Obtenido de *Monitoreo Forestal*.
- FAO. (1981). *Forestry Paper. Manual of Forest Inventory*.
- Fiorentin, L. D., de Miranda, R. O., Juvanhol, R. S., Péllico-Netto, S., Nascimento, R. G., & Machado, S. (2016). Método de Amostragem de Bitterlich aplicado em Floresta Ombrófila mista. Obtenido de *Rev. Bras. Biom.*, Lavras, Vol. 34. N.3, p.407-420.
- Fonseca, W., Benayas, J. M. R., & Alice, F. E. (2011). Carbon accumulation in the biomass and soil of different aged secondary forests in the humid tropics of Costa Rica. *Forest Ecology and Management*, 262(8), 1400-1408.

Fonseca, W., Ruíz, L., Rojas, M., y Alice, F. (2013). Modelos alométricos para la estimación de biomasa y carbono en *Alnus acuminata*. Obtenido de Revista de Ciencias Ambientales. Tropical Journal of Environmental Sciences. Vol. 46. (2), 37-50.

Fonseca, R. J. (2017). Oral and Maxillofacial Surgery-E-Book: 3-Volume Set. Obtenido de Elsevier Health Sciences.

Fragoso, P. (2003). Estimación del contenido y captura de carbono en biomasa aérea del predio Cerro Grande municipio de Tancítaro Michoacán, México (Doctoral dissertation, Tesis de licenciatura. Obtenido de Universidad Michoacana de San Nicolás de Hidalgo. Facultad de Agrobiología Presidente Juárez, México).

Gis Iberica (s/f). Dendrómetro -Reloscopio electrónico "Criterion RD1000" para inventario forestal. Recuperado de: <http://www.gisiberica.com/Relascopios/relascopio.htm>

González, C. G. A., Gallegos, A., Hernández, E., y Morales, M. (2002). Evaluación del tamaño y forma de sitio de muestreo para inventarios forestales en bosques tropicales. Publicación Proyecto CONACYT.

Gove, J. H. (2017). Some Refinements on the Comparison of Areal Sampling Methods via Simulation. Forests.

Heredia. (2003). Manual para productores de teca (*Tectona grandis* L.) en Costa Rica.

Hese, S., Lucht, W., Schmillius, C., Barnsley, M., Dubayah, R., Knorr, D., & Schröter, K. (2005). Global biomass mapping for an improved understanding of the CO₂ balance—the Earth observation mission Carbon-3D. Obtenido de *Remote Sensing of Environment*, 94(1), 94–104.

Ibrahim, M., Chacón, M., Cuartas, C., Naranjo, J., Ponce, G., Vega, P., y Rojas, J. (2006). Almacenamiento de carbono en el suelo y la biomasa arbórea en sistemas de usos de la tierra en paisajes ganaderos de Colombia, Costa Rica y Nicaragua. Obtenido de *Agroforestería en las Américas*. (45), 27-36.

INAHMI (2017). Anuario meteorológico. Instituto Nacional de Meteorología e Hidrología. Ecuador

IPCC. 1996. Revised 1996 IPCC Guidelines for National Greenhouse Gas Inventories. Disponible en: <https://www.ipcc-nggip.iges.or.jp/public/gl/lucfspan.html>

IPCC. 2003. Good Practice Guidance for LULUCF – Glossary.

Jauregui-Valarezo, K. F. (2016). Ecuaciones alométricas para estimar volumen y biomasa aérea de *Enterolobium cyclocarpum* y *Ceiba pentandra* en la Escuela Agrícola Panamericana Zamorano, Honduras. Obtenido de Tesis de grado.

Jiménez, E., & Landeta, A. (2009). Producción de biomasa y fijación de carbono en plantaciones de teca (*Tectona grandis* Linn F.) Campus Prosperina–ESPOL.

Kershaw Jr, J. A., Ducey, M. J., Beers, T. W., & Husch, B. (2016). *Forest mensuration*. Obtenido de John Wiley y Sons. 5ta Edición. Libro.

- Ketterings, Q. M., Coe, R., van Noordwijk, M., & Palm, C. A. (2001). Reducing uncertainty in the use of allometric biomass equations for predicting aboveground tree biomass in mixed secondary forests. Obtenido de *Forest Ecology and Management* 146: 199-209.
- Kinyanjui, M. J., Latva-Käyrä, P., Bhuvneshwar, P. S., Kariuki, P., Gichu, A., & Wamichwe, K. (2014). An inventory of the above ground biomass in the Mau Forest ecosystem, Kenya. Obtenido de *Open Journal of Ecology*, 4(10), 619.
- Köhl, M., Magnussen, S. S., & Marchetti, M. (2006). Sampling methods, remote sensing and GIS multiresource forest inventory. Obtenido de Springer Science y Business Media.
- Kollmann, F. (1959). Tecnología de la madera y sus aplicaciones. Obtenido de Tomo Primero. IFIE, Madrid.
- Le Quéré, C., Raupach, M. R., Canadell, J. G., Marland, G., Bopp, L., Ciais, P., & ... Friedlingstein, P. (2009). Trends in the sources and sinks of carbon dioxide. Obtenido de *Nature geoscience*, 2(12), 831.
- Leinonen, U., Koskinen, J., Makandi, H., Mauya, E., & Käyhkö, N. (2018). Open foris and google earth engine linking expert participation with natural resource mapping and remote sensing training in tanzania. Obtenido de *International Archives of the Photogrammetry, Remote Sensing & Spatial Information Sciences*, 42.
- Lema Tapias, A. (1979). Introducción a la dasimetría, Obtenido de UNIVERSIDAD NACIONAL DE COLOMBIA, Sede Medellín.

- Letourneau, F. (2017, October). Módulo de simulación de trozado de árboles del software "calcuLEMUs". Obtenido de n IX Congreso Argentino de AgroInformática (CAI 2017)-JAIIO 46-CLEI 43 (Córdoba, 2017).
- Lionjanga, D. L., y Pereira, E. (2014). Comparación de los métodos de muestreo casual simples: BITTERLICH Y PRODAN.
- Loetsch, F., Zöhrer, F., & Haller, K. (1973). Forest inventory. Obtenido de Vol. II.
- López, H. G., Vaides, E. E., y Alvarado, A. (2018). Evaluación de carbono fijado en la biomasa aérea de plantaciones de teca en Chahal, Alta Verapaz, Guatemala. Obtenido de Universidad de Costa Rica, Centro de Investigaciones Agronómicas, San José, Costa Rica. *Agronomía costarricense: Revista de ciencias agrícolas*, 42(1), 137-153.
- López, M. S. (2017). Evaluación y aprendizaje. Obtenido de MarcoELE: *Revista de Didáctica Español Lengua Extranjera*, (24), 3.
- Lorenz, M., Varjo, J., & Bahamondez, C. (2005). Forest assessment for changing information needs. AT.
- Lu, D. (2005). Aboveground biomass estimation using Landsat TM data in the Brazilian Amazon. Obtenido de *International Journal of Remote Sensing* 26: 2509-2525.
- Macedo, C. J. (2012). Tamaño óptimo de la unidad de muestreo para inventarios forestales en la comunidad campesina de Tres Unidos, Distrito del Alto Nanay. Obtenido de Región Loreto. Borrador de Tesis de Ingeniero Forestal. Facultad de Ciencias Forestales. Universidad Nacional de la Amazonía Peruana.

- MAGAP, M. (2015). Mapa de cobertura y uso de la tierra. Obtenido de www.agricultura.gob.ec
- McRoberts, R. E., Tomppo, E. O., y Czaplewski, R. I. (1992). Diseños de muestreo de las Evaluaciones Forestales Nacionales. Obtenido de Antología de conocimiento para la evaluación de los Recursos Forestales Nacionales, 1-21.
- Montero, G., Ruiz-Peinado, R., y Muñoz, M. (2005). Producción de biomasa y fijación de CO₂ por los bosques españoles, Ministerio de Educación y Ciencia Instituto Nacional de Investigación y Tecnología Agraria y Alimentaria. Obtenido de Madrid (España).
- Montes de Oca-Cano, E., García-Ramírez, P., Nájera-Luna, J. A., y Méndez-González, J. (2009). Ajuste de ecuaciones de biomasa para *Pinus durangensis* (Martínez M.) en la región de El Salto, Durango. Obtenido de Revista Chapingo Serie Ciencias Forestales y del Ambiente. Vol. 15. (1), 65-71.
- Moret, A. Y., Jerez, M., y Mora, A. (1998). Determinación de ecuaciones de volumen para plantaciones de teca (*Tectona grandis* L.) en la unidad experimental de la reserva forestal Caparo, Estado Barinas - Venezuela. Obtenido de Revista Forest. Venezuela. Vol. 42. (1), 41-50.
- Moscovich, F. A., y Brena, D. A. (2006). Comprobación de cinco métodos de muestreo forestal en un bosque nativo de *Araucaria angustifolia* Bert. O. Ktze. Pags. 12.
- Mulyana, B., Rohman, R., & Purwanto, R. H. (2018). Application of Point Sampling Method in Estimation of Stand Basal Area in Community Forest. *Journal of Sylva Indonesiana*, 1(1), 45-54.

- Návar-Cháidez, J., Rodríguez-Flores, F., y Domínguez-Calleros, P. A. (2013). Ecuaciones alométricas para árboles tropicales: aplicación al inventario forestal de Sinaloa, México. Obtenido de *Agronomía Mesoamericana*. Vol. 24. (2), 347-356.
- Ounban, W., Puangchit, L., & Diloksumpun, S. (2016). Development of general biomass allometric equations for *Tectona grandis* Linn. f. and *Eucalyptus camaldulensis* Dehnh. plantations in Thailand. Obtenido de *Agriculture and Natural Resources*, 50(1), 48-53.
- Pardé, J., & Bouchon, J. (1994). *Dasometría*. Obtenido de *Paraninfo*.
- Pardo, J. A. (2010). Los ecosistemas forestales y el secuestro de carbono ante el calentamiento global. Obtenido de *Pags*. 253.
- Peñalver, A., Rivas, J., Triana, A., Diaz, C., y Mora, J. (2018). Evaluación de tecnología de detección remota para la estimación de biomasa de Teca en la Región Costa del Ecuador. Obtenido de *SINDE*
- Pérez, D., y Kanninen, M. (2005). Stand growth scenarios for *Tectona grandis* plantations in Costa Rica. Obtenido de *Forest Ecology and management*, 210(1-3), 425-441.
- Picard, N., Saint-André, L., y Henry, M. (2012). *Manual de construcción de ecuaciones alométricas para estimar el volumen y la biomasa de los árboles: del trabajo de campo a la predicción*.
- Rice, B., Weiskittel, A. R., & Wagner, R. G. (2014). Efficiency of alternative forest inventory methods in partially harvested stands. *European Journal Forest Res*. Obtenido de *Springer*. (133), 261–272.

- Ruiz-Aquino, F., Valdez-Hernández, J. I., Manzano-Méndez, F., Rodríguez-Ortiz, G., Romero-Manzanares, A., y Fuentes-López, M. E. (2014). Ecuaciones de biomasa aérea para *Quercus laurina* y *Q. crassifolia* en Oaxaca. Obtenido de *Madera bosques*. Vol. 20. (2), 33-48.
- Schlegel, B. (2001). Estimación de la biomasa y carbono en bosques del tipo forestal siempreverde. Obtenido de Universidad Austral de Chile. Valdivia, Chile.
- Schlegel, B., Gayoso, J., y Guerra, J. (2000). Manual de procedimientos muestreos de biomasa forestal. Medición de la capacidad de captura de carbono en bosques de Chile y promoción en el mercado mundial. Obtenido de Universidad Austral de Chile. Pags. 26.
- Segura, M., y Andrade, H. J. (2008). ¿Cómo construir modelos alométricos de volumen, biomasa o carbono de especies leñosas perennes? Obtenido de *Agroforestería en las Américas* N° 46 2008. Pag. 89-96.
- Šmelko, Š. (2013). Nový Pohľad na Vlastnosti a Použitelnosť Kruhových a Relaskopických Skusných Plôch pri Inventarizácii a Monitorovaní Lesných Ekosystémov. *Lesnícky časopis - Forestry Journal*. Obtenido de *Forestry*. Vol. 59. (1), 1-18.
- Soest, J. V., Ayrál, P., Schober, R., y Hummel, F. C. (1969). La normalización de los símbolos en dasimetría (No. 634.9285 N842). Obtenido de FAO, Roma (Italia).
- Solano, D., Vega, C., Eras, V. H., y Cueva, K. (2014). Generación de modelos alométricos para determinar biomasa aérea a nivel de especies, mediante el método destructivo de baja intensidad para el estrato de bosque seco pluviestacional del Ecuador. Obtenido de *CEDAMAZ*, Vol. 4. (1), 32-44.

- Ståhl, G., Ringvall, A., Gove, J. H., & Ducey, M. J. (2002). Correction for slope in point and transect relascope sampling of downed coarse woody debris. *Forest Science*, 48(1), 85-92. Obtenido de OXFORD ACADEMIC.
- Ugalde Arias, L. A. (2002). El sistema MIRA-SILV (Manejo de información sobre Recursos Arbóreos), Componente de Silvicultura. Obtenido de Centro Agronómico Tropical de Investigación y Enseñanza (CATIE). Turrialba, Costa Rica.
- Van Laar, A., & Akça, A. (2007). *Forest mensuration* (Vol. 13). Obtenido de Springer Science & Business Media.
- Vásquez, A., y Arellano, H. (2012). Estructura, biomasa aérea y carbono almacenado en los bosques del sur y noroccidente de córdoba. Obtenido de Colombia. Artículo científico. 40 p.
- Vásquez, C. E. L. (2011). Aplicación de ecuaciones de conicidad para Teca (*tectona grandis* LF) en la zona costera ecuatoriana. *Ciencia y Tecnología*, 4(2), 19-27.
- Vastaranta, M., González, E., Luoma, V., Saarinen, N., Holopainen, M., & Hyypä, J. (2015). Evaluation of a Smartphone App for Forest Sample Plot Measurements. Obtenido de *Forests*. (6), 1179-1194.
- Vincent, V. (2018). Estimacion de biomasa y carbono en plantaciones de teca (*Tectona grandis* L. f.) por metodo indirecto de mapeo y mediante sistemas de informacion geografica. Obtenido de Tesis de grado. Universidad de Guadalajara. Pags. 80.

- Vyas, D., Mehta, N., Dinakaran, J., & Krishnayya, N. S. (2010). Allometric equations for estimating leaf area index (LAI) of two important tropical species (*Tectona grandis* and *Dendrocalamus strictus*). Obtenido de *Journal of Forestry Research*, 21(2), 197-200.
- Warner, A. J., Jamroenprucksasri, M., & Puangchit, L. (2016). Development and evaluation of teak (*Tectona grandis* L.f.) taper equations in northern Thailand. Obtenido de *Agriculture and Natural Resources*. Vol. 50, 362-367.
- West, G. B., Brown, J. H., & Enquist, B. J. (1999). The fourth dimension of life: fractal geometry and allometric scaling of organisms. Obtenido de *science*, 284(5420), 1677-1679.

ANEXOS

Tabla A1. Información de las parcelas de área fija

PARCELA	A	Ni	Na	dg	G	G _{bitt}	h (m)	hL	Hdom	hc	Lcopa	E	V	Vc	B	C	CO2	Calidad de Plantación	Total (horas: minutos)	
1	3	780	700	8.8	4.9	4.5	8.6	8.9	10.3	0.0	78%	53.8	27.5	0.0	22.7	11.3	41.6	56.4%	R	2:42:00
2	3	900	860	9.1	5.9	4.5	8.1	9.1	11.1	0.0	80%	80.3	33.2	0.0	27.5	13.8	50.5	57.8%	R	2:39:00
3	3	800	720	7.6	3.6	3.5	6.5	8.4	10.7	0.0	70%	56.5	19.7	0.0	16.8	8.4	30.9	50.0%	R	2:08:00
4	3	820	820	8.9	5.1	5.5	8.2	8.5	10.3	0.0	74%	69.9	28.5	0.0	23.2	11.6	42.5	65.9%	B	1:28:00
5	3	860	800	8.7	5.1	5.5	8.0	8.4	11.0	0.0	65%	73.2	28.1	0.0	23.5	11.7	43.1	74.4%	B	1:40:00
6	3	800	780	9.8	6.0	7.5	8.9	9.0	10.1	0.0	74%	72.8	34.0	0.0	28.2	14.1	51.8	82.5%	B	1:17:00
7	3	800	660	8.7	4.8	6.5	7.7	8.9	9.9	0.0	76%	57.1	26.4	0.0	23.1	11.5	42.3	55.0%	R	1:06:00
8	3	780	540	6.1	2.3	4.5	6.3	7.2	8.6	0.0	67%	26.1	11.6	0.0	9.8	4.9	18.0	46.2%	R	0:53:00
9	3	820	660	6.7	2.9	3.0	6.1	8.9	10.5	0.0	64%	42.6	16.3	0.0	13.4	6.7	24.6	39.0%	M	1:12:00
10	3	860	860	9.5	6.1	6.5	8.8	9.4	11.2	0.0	73%	99.9	35.6	0.0	28.6	14.3	52.4	67.4%	B	1:30:00
11	3	860	760	8.1	4.4	7.0	7.3	9.3	11.0	0.0	72%	72.9	25.4	0.0	20.7	10.3	38.0	60.5%	B	1:26:00
12	3	840	600	7.3	3.5	4.0	8.1	8.6	10.1	0.0	69%	46.4	19.9	0.0	15.9	8.0	29.2	50.0%	R	1:09:00
13	3	680	680	8.8	4.1	6.5	8.2	8.4	10.1	0.0	67%	65.6	22.8	0.0	18.6	9.3	34.1	82.4%	B	1:08:00
14	3	840	780	8.9	5.3	4.5	7.7	8.0	9.7	0.0	71%	68.6	27.6	0.0	24.3	12.1	44.5	69.0%	B	1:04:00
15	3	820	760	6.6	2.8	4.0	5.6	6.8	8.3	0.0	62%	38.2	13.8	0.0	11.9	6.0	21.9	58.5%	R	1:03:00
16	3	800	660	8.6	4.6	4.5	8.6	8.9	10.9	0.0	74%	56.7	26.3	0.0	21.6	10.8	39.6	50.0%	R	1:23:00
17	3	840	600	8.1	4.3	4.0	9.2	9.6	12.5	0.0	66%	55.9	25.6	0.0	20.2	10.1	37.0	33.3%	M	1:00:00
18	3	900	840	8.2	4.8	4.0	7.8	8.0	9.8	0.0	69%	91.1	25.8	0.0	21.4	10.7	39.2	60.0%	B	1:32:00
19	3	840	820	7.8	4.0	5.5	6.5	7.2	8.7	0.0	65%	84.3	20.1	0.0	17.7	8.9	32.5	47.6%	R	1:03:00
20	3	820	700	6.4	2.6	5.0	6.2	6.6	5.7	0.0	65%	55.5	12.8	0.0	10.8	5.4	19.9	51.2%	R	1:33:00
21	3	780	260	3.1	0.6	0.5	3.8	4.9	5.4	0.0	58%	10.7	2.4	0.0	2.4	1.2	4.4	23.1%	M	1:09:00
22	3	840	820	9.0	5.4	5.0	8.2	8.4	10.3	0.0	70%	73.6	29.4	0.0	24.4	12.2	44.9	54.8%	R	1:06:00
23	3	860	780	5.7	2.2	2.0	4.8	5.3	6.6	0.0	59%	50.0	9.7	0.0	8.9	4.4	16.3	48.8%	R	2:30:00
24	3	800	740	9.1	5.2	5.5	8.2	8.3	10.2	0.0	73%	85.2	28.3	0.0	24.2	12.1	44.4	62.5%	B	1:54:00
25	3	760	740	9.1	4.9	5.0	9.0	9.2	11.1	0.0	67%	62.4	28.7	0.0	22.4	11.2	41.2	47.4%	R	2:26:00
26	3	860	720	8.3	4.6	5.0	7.9	9.3	11.9	0.0	62%	60.8	26.8	0.0	22.0	11.0	40.4	25.6%	M	2:00:00
27	2	860	660	4.0	1.1	0.0	3.3	4.1	5.0	0.0	69%	28.3	4.1	0.0	4.0	2.0	7.3	23.3%	M	2:10:00
28	2	880	820	4.8	1.6	2.0	4.2	4.6	5.7	0.0	72%	41.5	6.6	0.0	6.0	3.0	11.0	56.8%	R	1:40:00
29	2	660	120	0.9	0.0	0.0	1.8	1.9	1.9	0.0	54%	2.9	0.1	0.0	0.1	0.1	0.2	9.1%	M	2:18:00
30	3	920	700	3.4	0.8	1.0	3.2	3.8	4.6	0.0	51%	24.1	3.1	0.0	2.9	1.5	5.3	32.6%	M	2:18:00
31	3	880	840	9.5	6.3	3.0	8.6	9.0	11.6	0.0	69%	118.5	35.3	0.0	29.7	14.9	54.6	54.5%	R	2:15:00
X̄	2.9	825	703	7.4	3.9	4.2	6.9	7.6	9.2	0.0	68%	58.9	21.1	0.0	17.6	8.8	32.4	51.5%	R	1:38:08
s	0.3	55.8	157.7	2.1	1.7	1.9	2.0	1.9	2.5	0.0	0.1	24.8	10.2	0.0	8.3	4.1	15.2	16.7%		0:32:52
CV (%)	10%	7%	22%	29%	44%	46%	28%	25%	27%	0%	10%	42%	48%	0%	47%	47%	47%	32%		33%
E	0.1	20.4	57.7	0.8	0.6	0.7	0.7	0.7	0.9	0.0	0.0	9.1	3.7	0.0	3.0	1.5	5.6	0.1		0:12:01
E (%)	4%	2%	8%	11%	16%	17%	10%	9%	10%	0%	3%	15%	18%	0%	17%	17%	17%	12%		12%

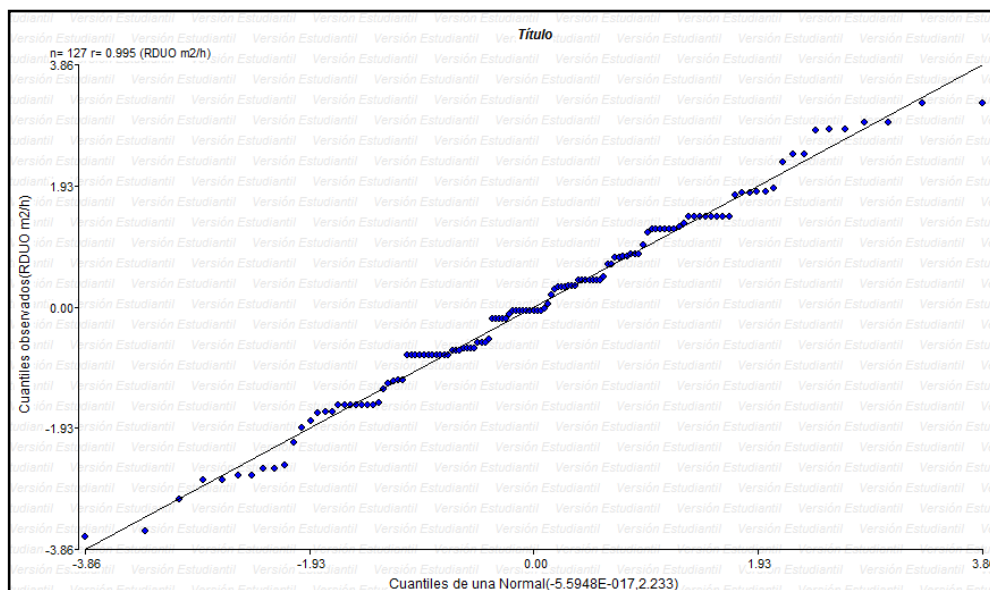
Elaborado por: El Autor

Tabla A3. Análisis estadístico de área basal

Cuadro de Análisis de la Varianza (SC tipo III)					
F.V.	SC	gl	CM	F	p-valor
Modelo	5.59	5	1.12	0.48	0.7898
G	5.59	5	1.12	0.48	0.7898
Error	281.35	121	2.33		
Total	286.95	126			

Elaborado por: El autor

Gráfico A1. Gráfico QQ plot de área basal



Elaborado por: El autor

Tabla A4. Prueba de normalidad (Shapiro) para el gráfico de área basal

Shapiro-Wilks (modificado)					
Variable	n	Media	D.E.	W*	p(Unilateral D)
RDUO m2/ha	127	0	1.49	0.97	0.1629

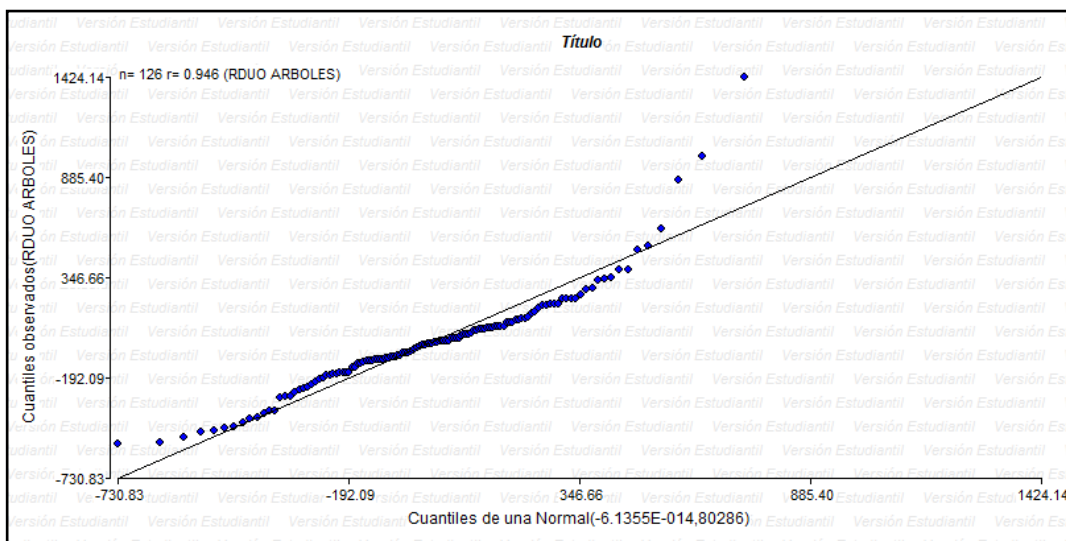
Elaborado por: El autor

Tabla A5. Análisis estadístico de número de árboles por hectárea

Cuadro de Análisis de la Varianza (SC tipo III)					
F.V.	SC	gl	CM	F	p-valor
Modelo	360212.63	5	72042.53	0.86	0.5093
N	360212.63	5	72042.53	0.86	0.5093
Error	10035780	120	83631.5		
Total	10395993	125			

Elaborado por: El autor

Gráfico A2. Gráfico QQ plot de número de árboles por hectárea



Elaborado por: El autor

Tabla A6. Prueba de normalidad (Shapiro) para el gráfico de número de árboles

Shapiro-Wilks (modificado)					
Variable	n	Media	D.E.	W*	p(Unilateral D)
RDUO ARBOLES	126	0	283.35	0.91	<0.0001

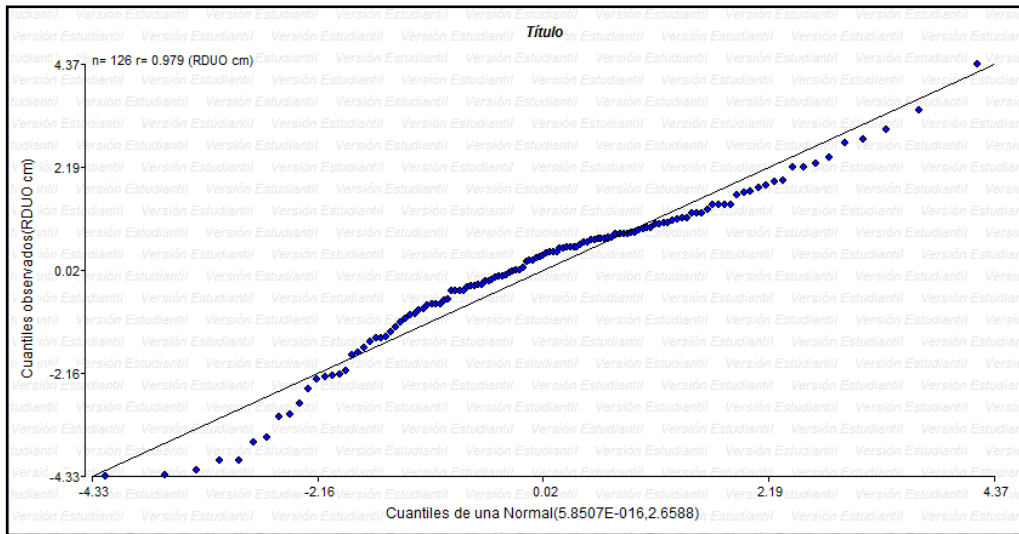
Elaborado por: El autor

Tabla A7. Análisis estadístico de número de diámetro promedio por árbol

Cuadro de Análisis de la Varianza (SC tipo III)					
F.V.	SC	gl	CM	F	p-valor
Modelo	13.46	5	2.69	0.97	0.4376
D	13.46	5	2.69	0.97	0.4376
Error	332.34	120	2.77		
Total	345.81	125			

Elaborado por: El autor

Gráfico A3. Gráfico QQ plot de diámetro promedio por árbol



Elaborado por: El autor

Tabla A8. Prueba de normalidad (Shapiro) para el gráfico de diámetro promedio

Shapiro-Wilks (modificado)					
Variable	n	Media	D.E.	W*	p(Unilateral D)
RDUO cm	126	0.00	1.63	0.95	<0.0001

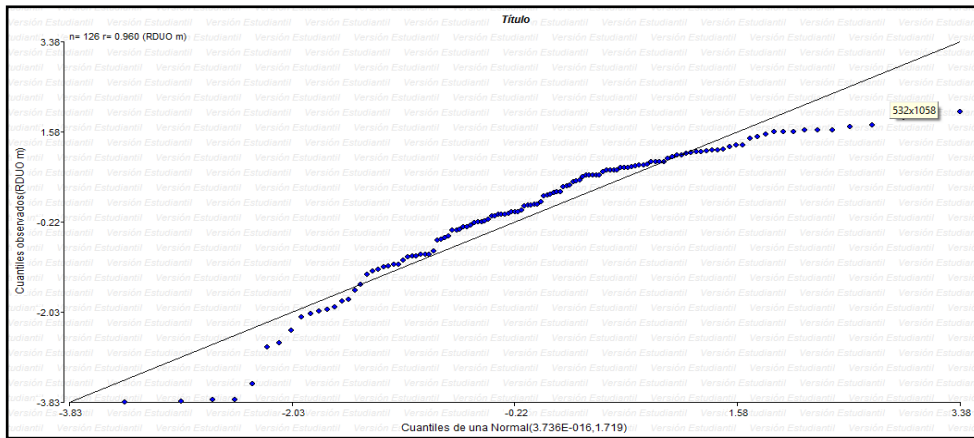
Elaborado por: El autor

Tabla A9. Análisis estadístico de altura promedio por árbol

Cuadro de Análisis de la Varianza (SC tipo III)					
F.V.	SC	gl	CM	F	p-valor
Modelo	1.17	5	0.23	0.13	0.9852
h	1.17	5	0.23	0.13	0.9852
Error	214.87	120	1.79		
Total	216.04	125			

Elaborado por: El autor

Gráfico A4. Gráfico QQ plot de altura promedio por árbol



Elaborado por: El autor

Tabla A10. Prueba de normalidad (Shapiro) para el gráfico de altura promedio

Shapiro-Wilks (modificado)					
Variable	n	Media	D.E.	W*	p(Unilateral D)
RDUO m	126	0.00	1.31	0.90	<0.0001

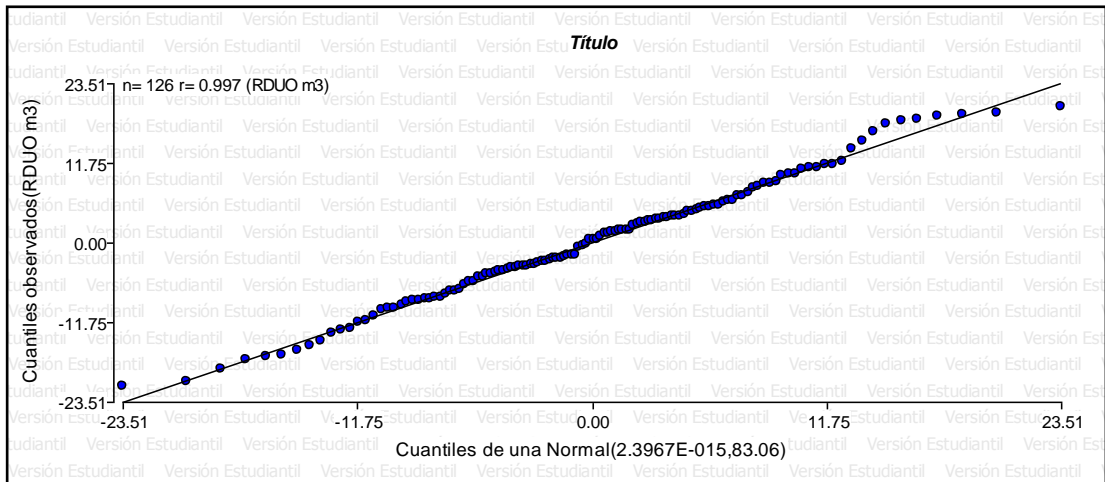
Elaborado por: El autor

Tabla A11. Análisis estadístico de volumen por hectárea

Cuadro de Análisis de la Varianza (SC tipo III)						
F.V.	SC	gl	CM	F	p-valor	
Modelo	153.57	5	30.71	0.35	0.8782	
V	153.57	5	30.71	0.35	0.8782	
Error	10382.47	120	86.52			
Total	10536.03	125				

Elaborado por: El autor

Gráfico A5. Gráfico QQ plot de altura promedio por árbol



Elaborado por: El autor

Tabla A12. Prueba de normalidad (Shapiro) para el gráfico de altura promedio

Shapiro-Wilks (modificado)					
Variable	n	Media	D.E.	W*	p(Unilateral D)
RDUO m ³	126	0.00	9.11	0.98	0.2178

Elaborado por: El autor

Gráfico A6. Vista general del sector del trabajo



Elaborado por: El autor

Gráfico A7. Delimitación de la parcela de trabajo



Elaborado por: El autor

Gráfico A8. Toma da datos de medición de todas las variables por árbol



Elaborado por: El autor

Gráfico A9. Toma da datos de medición de todas las variables por árbol



Elaborado por: El autor



**Presidencia
de la República
del Ecuador**



**Plan Nacional
de Ciencia, Tecnología,
Innovación y Saberes**



SENESCYT
Secretaría Nacional de Educación Superior,
Ciencia, Tecnología e Innovación

DECLARACIÓN Y AUTORIZACIÓN

Yo, **Mora Espinoza, Javier Alexander**, con C.C: # 1309846663 autor/a del trabajo de titulación: **Evaluación del método de muestreo angular para el inventario de plantaciones forestales de Teca en la Región Costa del Ecuador** previo a la obtención del título de **Ingeniero Agropecuario** en la Universidad Católica de Santiago de Guayaquil.

1.- Declaro tener pleno conocimiento de la obligación que tienen las instituciones de educación superior, de conformidad con el Artículo 144 de la Ley Orgánica de Educación Superior, de entregar a la SENESCYT en formato digital una copia del referido trabajo de titulación para que sea integrado al Sistema Nacional de Información de la Educación Superior del Ecuador para su difusión pública respetando los derechos de autor.

2.- Autorizo a la SENESCYT a tener una copia del referido trabajo de titulación, con el propósito de generar un repositorio que democratice la información, respetando las políticas de propiedad intelectual vigentes.

Guayaquil, 19 de marzo de 2019

Nombre: **Mora Espinoza, Javier Alexander**

C.C: 1208023984

REPOSITORIO NACIONAL EN CIENCIA Y TECNOLOGÍA			
FICHA DE REGISTRO DE TESIS/TRABAJO DE TITULACIÓN			
TEMA Y SUBTEMA:	Evaluación del método de muestreo angular para el inventario de plantaciones forestales de Teca en la Región Costa del Ecuador		
AUTOR(ES)	Mora Espinoza, Javier Alexander.		
REVISOR(ES)/TUTOR(ES)	Ing. Peñalver Romeo, Alberto, Ph.D.		
INSTITUCIÓN:	Universidad Católica de Santiago de Guayaquil		
FACULTAD:	Educación Técnica Para El Desarrollo.		
CARRERA:	Ingeniería Agropecuaria		
TÍTULO OBTENIDO:	Ingeniero Agropecuario		
FECHA DE PUBLICACIÓN:	19 de Marzo de 2019	No. DE PÁGINAS:	81
ÁREAS TEMÁTICAS:	Teca, Inventarios Forestales		
PALABRAS CLAVES/KEYWORDS:	Método Bitterlich, técnicas de muestreo, Inventario Forestal, Tectona grandis, simulación.		
RESUMEN/ABSTRACT:	<p>Se contrasta la precisión y eficiencia estadística entre dos métodos de inventario, el muestreo angular y el muestreo de parcelas de superficie fija, para la estimación de variables dasométricas en plantaciones forestales de Teca de la Región Costa de Ecuador. Se realizó un muestreo simple aleatorio sin reemplazo para delimitar 31 parcelas circulares de 500 m² en una plantación de tres años. En cada parcela se midió el diámetro normal, la altura de cada árbol y los tiempos de trabajo, registrando además su posición en el sistema de referencia WGS84-UTM-17S mediante un RTK. A partir de las variables medidas en campo se calculó el número de árboles por hectárea, diámetro de área basal media, área basal total, altura promedio de Lorey, volumen total, biomasa aérea, fijación de CO₂ y contenido de carbono en la biomasa aérea. A partir de la georreferenciación de cada árbol en la parcela circular de área fija se simuló la selección de los árboles de acuerdo a los factores de área basimétrica 0.5, 1, 1.5 y 2. Para los datos generados mediante la simulación del muestreo angular se calcularon los estadísticos de tendencia central y dispersión de las variables, aplicando un análisis ANOVA y prueba de Tukey para evaluar las diferencias de medias de las variables. Los resultados obtenidos evidencian que el método de conteo angular es suficientemente preciso para la estimación de las principales variables dasométricas de plantaciones jóvenes de teca, presentado además una mayor eficiencia en relación al muestreo de parcelas de superficie fija.</p>		
ADJUNTO PDF:	<input checked="" type="checkbox"/> SI	<input type="checkbox"/> NO	
CONTACTO CON AUTOR/ES:	Teléfono: +593 939990344	E-mail: javi.alex10@hotmail.com	
CONTACTO CON LA INSTITUCIÓN (COORDINADOR DEL PROCESO UTE):	Nombre: Ing. Noelia Caicedo Coello, M.Sc.		
	Teléfono: +593 987361675		
	noelia.caicedo@cu.ucsg.edu.ec		
SECCIÓN PARA USO DE BIBLIOTECA			
Nº. DE REGISTRO (en base a datos):			
Nº. DE CLASIFICACIÓN:			
DIRECCIÓN URL (tesis en la web):			