



# **COLEGIO DE POSTGRADUADOS**

**INSTITUCIÓN DE ENSEÑANZA E INVESTIGACIÓN EN CIENCIAS AGRÍCOLAS  
CAMPUS MONTECILLO  
POSTGRADO EN CIENCIAS FORESTALES**

**SISTEMA INFORMÁTICO QUE ESTIMA EL INVENTARIO Y  
PREDICE EL CRECIMIENTO Y RENDIMIENTO MADERABLE  
EN PLANTACIONES DE EUCALIPTO**

**MOISÉS GARCÍA NIETO**

**T E S I S**

**PRESENTADA COMO REQUISITO PARCIAL  
PARA OBTENER EL GRADO DE:**

**DOCTOR EN CIENCIAS**

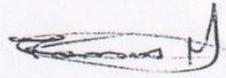
**MONTECILLO, TEXCOCO, EDO. DE MÉXICO  
2016**

La presente tesis titulada “**Sistema informático que estima el inventario y predice el crecimiento y rendimiento maderable en plantaciones de eucalipto**”, realizada por el alumno **Moisés García Nieto**, bajo la dirección del Consejo Particular indicado, ha sido aprobada por el mismo y aceptada como requisito parcial para obtener el grado de:

**DOCTOR EN CIENCIAS FORESTALES**

**CONSEJO PARTICULAR**

**CONSEJERO**



**Dr. Tomás Martínez Trinidad**

**ASESOR**



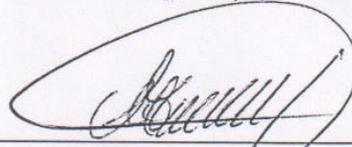
**Dr. Oziel Lugo Espinosa**

**ASESOR**



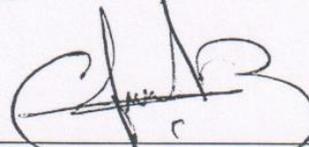
**Dr. Enrique Arjona Suarez**

**ASESOR**



**Dr. Miguel Acosta Mireles**

**ASESOR**



**Dr. Marcos Jiménez Casas**

Montecillo, Texcoco, Estado de México, febrero de 2016.

# **SISTEMA INFORMÁTICO QUE ESTIMA EL INVENTARIO Y PREDICE EL CRECIMIENTO Y RENDIMIENTO MADERABLE EN PLANTACIONES DE EUCALIPTO**

MOISÉS GARCÍA NIETO, DC.

COLEGIO DE POSTGRADUADOS, 2016

## **RESUMEN**

La ejecución de un inventario y los procesos administrativos que involucra se ven afectados en muchas ocasiones por la deficiente captura de datos, la cantidad de tiempo empleado y el alto costo de obtenerlos, lo cual hace que la estimación de volumen del arbolado se dificulte. El uso de métodos incorporados a un sistema de cómputo permite facilitar las actividades de toma de decisiones en campo y en oficina disminuyendo los errores. Por tanto el objetivo del trabajo fue, desarrollar un sistema informático con la capacidad de estimar el inventario y predecir el crecimiento y rendimiento maderable en plantaciones de eucalipto del sureste mexicano. El sistema integra los métodos de muestreo (aleatorio simple, aleatorio estratificado, razón y regresión), un sistema de crecimiento y rendimiento maderable para la región que utiliza cinco ecuaciones (altura dominante, área basal, número de árboles sobrevivientes, volumen total y diámetro cuadrático), un proceso de captura electrónica de datos a través de una base de datos común entre el sistema principal y la interfaz externa y, finalmente una propuesta para estimar la altura del arbolado mediante el uso de redes neuronales. Un proceso complementario al sistema de crecimiento y rendimiento maderable permitió proyectar el volumen por sitio y un método para medir la altura del arbolado; ambos procesos se podrán implementar posteriormente en el sistema. Por tanto, el sistema informático generado mediante una aplicación en una tableta digital permite capturar los datos del inventario y los transferirlos al software “EICRM” encargado de estimar el inventario y el crecimiento-rendimiento maderable de la plantación.

**Palabras clave:** sistema informático, plantación forestal, inventario forestal, método de muestreo, sistema de crecimiento y rendimiento maderable.

# **COMPUTING SYSTEM THAT INVENTORY ESTIMATES AND PREDICTS GROWTH AND TIMBER YIELD IN EUCALYPTUS PLANTATIONS**

MOISÉS GARCÍA NIETO, DC.

COLEGIO DE POSTGRADUADOS, 2016

## **ABSTRACT**

The development of an inventory and administrative processes involved are often affected by the poor data collection, the time spent, and the required high cost, which complicates the estimated tree volume. Using methods incorporated into a computer system can facilitate decision-making activities in the field and office and at the same time reducing errors. Therefore, the objective of this study was to develop a computer system with the ability to estimate and predict inventory growth and timber yield in eucalyptus plantations in southeast Mexico. The system integrates sampling methods (simple random, stratified random, ratio and regression), a system of timber growth and yield for the region that uses five equations (dominant height, basal area, number of surviving trees, total volume and diameter squared), a process of electronic data capture through a common database between the host and the external interface, and finally a proposal to estimate the tree height using neural networks. A complementary process to the growth and performance system allowed projecting timber volume per site and a method for measuring the height of the trees; both processes can be implemented in the system. Therefore, the computer system generated by a digital tablet application allowed capturing inventory data and transferring them to "EICRM" software responsible for estimating the inventory and growth-yield in the timber plantation.

**Key words:** computer system, forest plantation, forest inventory, sampling method, growth and timber yield system.

## **AGRADECIMIENTOS**

Quiero expresar mi gratitud al Colegio de Postgraduados por su excelencia, y en especial al Postgrado en Ciencias Forestales por haberme dado la oportunidad de continuar con mi preparación académica.

Al Consejo Nacional de Ciencia y Tecnología (CONACyT) quien financió mis estudios de maestría y doctorado.

Al *Dr. Tomás Martínez Trinidad* mi profesor consejero, por su estímulo académico, motivación, disposición y apoyo total.

Al *Dr. Héctor Manuel De Los Santos Posadas*, por sus enseñanzas, su motivación, disposición, confianza y apoyo incondicional.

A los doctores: *Dr. Oziel Lugo Espinosa, Dr. Enrique Arjona Suarez, Dr. Miguel Acosta Mireles* y *Dr. Marcos Jiménez Casas*, por toda la confianza depositada en mí, por su disposición, apoyo, consejos y observaciones para enriquecer los escritos.

A mis demás profesores que contribuyeron en mi formación académica durante la estadía en el Colegio de Postgraduados: *Dr. José René Valdez Lazalde, Dr. Manuel Sandoval Villa, Dr. José Luis García Cue, Dr. Gilberto Rendón Sánchez, Dr. Alejandro Velázquez Martínez.*

A mis queridos amigos y compañeros: *Ángel Leyva Ovalle, Efraín Velasco Bautista, Verónica Ortega Baranda, Alfredo Esteban Tadeo Noble, María de los Ángeles Soriano Luna.*

*Dedico esta tesis:*

A mi esposa, *María Del Carmen Contreras Díaz*, por su amor incondicional y por ser una compañera excepcional y perseverante como muestra de mi amor y agradecimiento.

A mis hijos, *Moisés* y *Mauricio*, por ser la parte más importante de nuestra familia y porque son la fuerza perpetua que me impulsa para seguir adelante.

A mi madre, *Guadalupe Nieto De la Cruz*, y al recuerdo de mi padre, *Moisés García Saldívar†*, porque me enseñaron que el trabajo constante lleva al éxito.

A mis hermanos, *Judith*, *Lidia*, *Natalia* y *Jorge Alberto*, por su apoyo constante.

*Nunca he encontrado  
una persona tan ignorante,  
que no se pueda aprender  
algo de ella.*  
**(Galileo Galilei)**

*La educación, es el arma  
más poderosa que puedes usar  
para cambiar el mundo.*  
**(Nelson Mandela)**

*“Una mente brillante,  
es aquella que emite luz  
cuando crea sus ideas  
y aumenta su lucidez  
al navegar en el  
espacio del conocimiento.”*  
**(Moisés García Nieto)**

## CONTENIDO

<b>LISTA DE CUADROS</b> .....	x
<b>LISTA DE FIGURAS</b> .....	xi
<b>CAPÍTULO I</b> .....	<b>1</b>
<b>1. INTRODUCCIÓN</b> .....	<b>1</b>
<b>1.1. GENERALIDADES</b> .....	<b>1</b>
<b>1.2. DESCRIPCIÓN DEL ÁREA DE ESTUDIO</b> .....	<b>2</b>
<b>1.3. OBJETIVOS</b> .....	<b>2</b>
1.3.1. Objetivo general.....	2
1.3.2. Objetivos específicos .....	3
<b>CAPÍTULO II</b> .....	<b>4</b>
<b>2. APLICACIÓN DEL PROCESO UNIFICADO EN EL DESARROLLO DE UN SOFTWARE QUE ESTIMA EL INVENTARIO Y EL CRECIMIENTO-RENDIMIENTO MADERABLE EN PLANTACIONES DE EUCALIPTO</b> .....	<b>4</b>
<b>2.1. RESUMEN</b> .....	<b>4</b>
<b>2.2. ABSTRACT</b> .....	<b>5</b>
<b>2.3. INTRODUCCIÓN</b> .....	<b>6</b>
<b>2.4. MATERIALES Y MÉTODOS</b> .....	<b>7</b>
2.4.1. Software y hardware .....	7
2.4.2. Datos dasométricos.....	8
2.4.3. Estimadores de muestreo.....	8
2.4.4. Modelos de cubicación .....	11
2.4.5. Sistema de ecuaciones del modelo de crecimiento y rendimiento ..	12
2.4.6. Desarrollo de software.....	13
2.4.7. Análisis del sistema .....	14
2.4.8. Modelado de datos .....	15
2.4.9. Descripción del sistema .....	15
2.4.10. Implementación .....	17
2.4.11. Pruebas .....	17

2.4.11.1. Validación.....	17
2.4.11.2. Calidad de software.....	18
<b>2.5. RESULTADOS Y DISCUSIÓN .....</b>	<b>19</b>
2.5.1. Validación experimental.....	21
2.5.2. Calidad del software.....	22
<b>2.6. CONCLUSIONES .....</b>	<b>25</b>
<b>CAPÍTULO III .....</b>	<b>26</b>
<b>3. INTERFAZ MÓVIL PARA LA CAPTURA DE DATOS DE INVENTARIO EN PLANTACIONES DEL GÉNERO (<i>Eucalyptus</i>) UTILIZADOS POR EL SOFTWARE “EICRM” .....</b>	<b>26</b>
<b>3.1. RESUMEN .....</b>	<b>26</b>
<b>3.2. ABSTRACT .....</b>	<b>27</b>
<b>3.3. INTRODUCCIÓN .....</b>	<b>28</b>
<b>3.4. MATERIALES Y MÉTODOS.....</b>	<b>29</b>
3.4.1. Herramientas para la construcción de la aplicación.....	29
3.4.2. Análisis de la aplicación.....	30
3.4.3. Diseño de la aplicación .....	31
3.4.4. Desarrollo de la aplicación .....	32
3.4.5. Pruebas de funcionamiento.....	33
<b>3.5. RESULTADOS Y DISCUSIÓN .....</b>	<b>35</b>
3.5.1. Calidad del software.....	37
<b>3.6. CONCLUSIONES .....</b>	<b>41</b>
<b>CAPÍTULO IV.....</b>	<b>42</b>
<b>4. ESTIMACIÓN DE VOLUMEN POR SITIO USANDO REMEDICIONES Y ESTIMADOR DE RAZÓN EN PLANTACIONES DE EUCALIPTO .....</b>	<b>42</b>
<b>4.1. RESUMEN .....</b>	<b>42</b>
<b>4.2. ABSTRACT .....</b>	<b>43</b>
<b>4.3. INTRODUCCIÓN .....</b>	<b>44</b>
<b>4.4. MATERIALES Y MÉTODOS.....</b>	<b>46</b>
4.4.1. Datos dasométricos.....	46
4.4.2. Modelos de cubicación .....	46

4.4.3.	Sistema de ecuaciones del modelo de crecimiento y rendimiento ..	47
4.4.4.	Cálculo del estimador de razón utilizando remediación de parcelas	47
4.4.5.	Selección del tamaño de muestra preliminar para la comprobación del volumen entre el EICRM contra remediación y la comparación de volumen entre el SCRM y el estimador de razón.....	49
4.4.6.	Comparación del volumen proyectado entre el software EICRM contra los sitios de remediación .....	49
4.4.7.	Comparación de volumen proyectado entre el estimador de razón y los sitios de remediación .....	50
<b>4.5.</b>	<b>RESULTADOS Y DISCUSIÓN .....</b>	<b>50</b>
<b>4.6.</b>	<b>CONCLUSIONES .....</b>	<b>55</b>
<b>CAPÍTULO V.....</b>	<b>.....</b>	<b>56</b>
<b>5.</b>	<b>ESTIMACIÓN DE LA ALTURA TOTAL EN PLANTACIONES DE EUCALIPTO APLICANDO REDES NEURONALES .....</b>	<b>56</b>
<b>5.1.</b>	<b>RESUMEN .....</b>	<b>56</b>
<b>5.2.</b>	<b>ABSTRACT .....</b>	<b>57</b>
<b>5.3.</b>	<b>INTRODUCCIÓN .....</b>	<b>58</b>
<b>5.4.</b>	<b>MATERIALES Y MÉTODOS.....</b>	<b>60</b>
5.4.1.	Redes Neuronales Artificiales (RNA).....	60
5.4.2.	Datos dasométricos.....	61
5.4.3.	Estructura del modelo matemático.....	61
5.4.4.	Diseño de la red neuronal .....	63
<b>5.5.</b>	<b>RESULTADOS ESPERADOS.....</b>	<b>64</b>
<b>5.6.</b>	<b>CONCLUSIONES ESPERADAS.....</b>	<b>65</b>
<b>6.</b>	<b>CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES GENERALES.....</b>	<b>66</b>
<b>7.</b>	<b>LITERATURA CITADA .....</b>	<b>68</b>

## LISTA DE CUADROS

Cuadro 2.1. Estimadores del Muestreo Simple Aleatorio.....	8
Cuadro 2.2. Estimadores del Muestreo Aleatorio Estratificado.....	9
Cuadro 2.3. Estimadores de Razón (proporción) y Regresión. ....	10
Cuadro 2.4. Estimadores de Razón Estratificada. ....	11
Cuadro 2.5. Modelos para la cubicación del arbolado. ....	12
Cuadro 2.6. Ecuaciones del modelo de crecimiento y rendimiento maderable. ....	13
Cuadro 2.7. Resultados de los estimadores aplicados por la empresa y el software. ....	21
Cuadro 2.8. Estadísticos obtenidos de los once factores de calidad. ....	22
Cuadro 2.9. Resultados de la calificación de los usuarios finales sobre la calidad del software. ....	23
Cuadro 3.1. Estadísticos obtenidos de los once factores de calidad ....	37
Cuadro 3.2. Opinión de los usuarios finales sobre la calidad del software ....	39
Cuadro 4.1. Modelos para la cubicación de volumen total del arbolado en pie. ....	46
Cuadro 4.2. Ecuaciones del modelo de crecimiento y rendimiento maderable ....	47
Cuadro 4.3. Estimadores para el Muestreo Aleatorio Simple.....	48
Cuadro 4.4. Estimadores para el muestreo de Razón (Proporción). ....	49
Cuadro 4.5. Estadísticas de regresión para los métodos de proyección de volumen.....	53

## LISTA DE FIGURAS

Figura 2.1. Diagrama de actividad del sistema anterior. En él se observa a los participantes (ingeniero forestal y capturista) además de las tareas realizadas por cada uno.. .....	14
Figura 2.2. Diagrama de actividad para el módulo del inventario. En él se observan los pasos que se deben seguir, para estimar la cantidad total de madera en las plantaciones. ....	16
Figura 2.3. Diagrama de actividad del módulo de simulación. En él se observan los pasos que se deben seguir, para predecir las existencias maderables en las plantaciones. ....	17
Figura 2.4. Unificación de la calidad por medio de los modelos (McCall e ISO 9126). Considerando cinco atributos y once factores, destinados al usuario, para evaluar la calidad de software. ....	18
Figura 2.5. Modelo relacional de base de datos. Incluye siete afinidades (Árboles, Sitio, Pedios, Contratos, Orden, Inventario y Usuarios) y cinco relaciones (uno a muchos).....	19
Figura 2.6. Pantalla del módulo de estimación del inventario indicando los estimadores del muestreo aleatorio simple del sistema EICRM .....	20
Figura 2.7. Pantalla del módulo de proyección del crecimiento y rendimiento maderable del sistema EICRM. En ella se observan los valores (iniciales y finales) de las variables, después de hacer la proyección.....	20
Figura 2.8. Categorías de calidad por factor. Los valores por encima de las barras representan la media de cada factor de calidad, se puede apreciar que seis de ellos se encuentran en un nivel de calidad buena y los otros cinco tienen una calidad aceptable .....	23

Figura 3.1. Procedimiento actual para la recopilación de datos en campo .....	30
Figura 3.2. Proceso de recopilación de datos en campo mediante la aplicación.....	31
Figura 3.3. Metodología ISO 9126 y 14958 apartado 5. La cual considera seis atributos destinados al usuario para evaluar la calidad de software.....	34
Figura 3.4. Interfaz del dispositivo móvil (tableta). Incluye las variables que se tienen que capturar para estimar el inventario y las acciones para almacenar la información en la base de datos .....	36
Figura 3.5. Categorías de calidad por factor. Los valores colocados encima de las barras representan la media y la mediana de cada factor de calidad, se aprecia que tres de ellos se encuentran en un nivel de calidad buena y los restantes de calidad aceptable .....	38
Figura 3.6. Categorías de calidad por usuario. Los valores por encima de cada sector circular representan el promedio de los seis factores de calidad, se puede apreciar que 7 usuarios consideraron que la aplicación tiene una calidad de buena a excelente, mientras que 3 mencionaron que tiene una calidad aceptable de acuerdo a la medida central “media”.....	40
Figura 4.1. Pantalla que proyecta en el tiempo las variables del SCRМ en el software EICRM .....	52
Figura 4.2. Análisis de residuales de la regresión (A) y curva de regresión ajustada para el volumen obtenido a través del estimador de razón (B).....	54
Figura 5.1. Esquema general de una red neuronal artificial (RNA).....	61

## **CAPÍTULO I. INTRODUCCIÓN**

### **1.1. GENERALIDADES**

La sustentabilidad de los ecosistemas es trascendente porque favorece el uso social, ecológico y económico de los recursos forestales de la sociedad actual y de las generaciones futuras (Martínez *et al.*, 2006; Pereira *et al.*, 2012). Las plantaciones forestales son proyectos, en varios casos, financiados por empresas que buscan reincorporar áreas degradadas y al mismo tiempo que contribuyan a su economía. Como proyectos de largo plazo requieren de procesos claros y consistentes de seguimiento y evaluación para su adecuada administración y producción. La producción de las plantaciones forestales se destina aproximadamente en un 85 % en leña o madera para pulpa, un 10 % en postes y productos de madera en rollo y 5 % en madera aserrada (Martínez *et al.* 2006). Uno de los géneros más utilizado y comercializado ampliamente por la industria en la producción de gran variedad de productos, es el *Eucalyptus* (Boca *et al.*, 20015). De hecho, el éxito de una plantación se basa en el aumento continuo de sus dimensiones: altura, diámetro, área basal y volumen en un periodo de tiempo específico (Pérez *et al.* 2012).

Los inventarios forestales son herramientas a las que se recurre para tener conocimiento de los recursos, esta información es útil para planificar y aplicar un manejo silvícola, el cual es importante para promover el crecimiento de los árboles y obtener un mayor volumen maderable (Ledo *et al.*, 2012). Esta información dasométrica requiere de actualizaciones constantes, sin embargo, para poder realizarlas hay que invertir mucho tiempo y dinero por lo que muchas empresas optan por buscar nuevos métodos que faciliten los procesos. El uso de varias herramientas permite realizar proyecciones certeras para planificar las actividades silvícolas y orientar la toma de decisiones, entre ellas las de tipo financiero y contable (Roldan *et al.*, 2013). Por ello, resulta

importante integrar, métodos científicos, herramientas tecnológicas y conocimientos empíricos para facilitar los procesos silvícolas, productivos y administrativos presentes en las plantaciones forestales comerciales.

En este sentido el desarrollo de software representa una alternativa que ayuda a facilitar las tareas y hacerlas eficientes. Para llevar a cabo este proceso se gestionan proyectos los cuales son guiados por objetivos definidos entre el cliente y el equipo de trabajo. Estos proyectos tienen gran impacto y importancia económica, política y social; el éxito de los mismos radica en algunos factores como, la participación de los usuarios, apoyo de la gestión ejecutiva, declaración clara de las necesidades, planificación adecuada, expectativas realistas, personal competente (Pérez y Zuleta, 2013).

## **1.2. DESCRIPCIÓN DEL ÁREA DE ESTUDIO**

El estudio se desarrolló con datos de las plantaciones de establecidas en los municipios de Agua Dulce y Las Choapas, en el estado de Veracruz (17°55' de Latitud Norte y 94°06' de Longitud Oeste) con clima cálido-regular y temperatura promedio de 27.0°C. Los ecosistemas que existen en el municipio son selva baja perennifolia y caducifolia (Méndez *et al.* 2008). Otra parte de las plantaciones está en la región de Huimanguillo, Tabasco (17°19' de Latitud Norte y 93°23' de Longitud Oeste), donde el clima predominante es cálido-húmedo con abundantes lluvias en verano y temperatura media anual de 26.2°C teniendo máximas hasta de 45.0°C. En la zona existen áreas con vegetación diversa, pero se encuentran ecosistemas forestales de selva alta perennifolia (Méndez *et al.* 2008; Velázquez *et al.* 2009).

## **1.3. OBJETIVOS**

### 1.3.1. Objetivo general

Desarrollar un sistema computacional que estime el inventario y, el crecimiento y rendimiento maderable de las plantaciones de eucalipto del sureste mexicano; a través de la integración de métodos de muestreo, un sistema de crecimiento y rendimiento, un proceso de captura electrónica de datos y un método que estime la altura del arbolado mediante el uso de redes neuronales.

### 1.3.2. Objetivos específicos

- Desarrollar un software de calidad aceptable que facilite y agilice el cálculo del inventario y la proyección del mismo, a través de tres métodos de muestreo y un sistema de crecimiento y rendimiento maderable para plantaciones comerciales de eucalipto.
- Definir un esquema de muestreo óptimo que permita estimar el inventario maderable de las plantaciones forestales comerciales de manera confiable y precisa, mismo que garantice la reducción de los costos por efectos de levantamiento de información de campo y que a su vez, permita la actualización de los mismos.
- Generar un Sistema de Crecimiento Rendimiento Maderable (SCRM) compatible con los datos de inventario y que permita la actualización del mismo.
- Determinar el crecimiento y rendimiento maderable en función de categorías diamétricas con base a los datos recabados en los inventarios operativos, así como las existencias volumétricas por cada tipo de producto clasificados por la misma empresa.

## **CAPÍTULO II. APLICACIÓN DEL PROCESO UNIFICADO EN EL DESARROLLO DE UN SOFTWARE QUE ESTIMA EL INVENTARIO Y EL CRECIMIENTO-RENDIMIENTO MADERABLE EN PLANTACIONES DE EUCALIPTO**

### **2.1. RESUMEN**

Se desarrolló un software mediante el Proceso Unificado Racional para estimar el inventario y el crecimiento-rendimiento maderable “EICRM” en plantaciones comerciales de eucalipto en Las Choapas, Veracruz y en Huimanguillo Tabasco, México. El software permite estimar el inventario a través de los muestreos, aleatorio simple, aleatorio estratificado y razón-regresión; mientras que las existencias maderables son proyectadas con un sistema de ecuaciones de crecimiento y rendimiento. Los módulos permiten agregar, consultar y eliminar datos, así como exportarlos a Microsoft Excel. La validación del programa se hizo con datos del inventario 2012, con 976 sitios temporales y un total de 32 744 árboles, distribuidos en 5896 ha., indicando una consistencia entre los resultados calculados por la empresa y el software. Por otro lado, la prueba de calidad demostró que 55 % de los factores presentan un nivel de calidad buena y que 45 % cumple con una calidad aceptable; mientras que un 67 % de los usuarios finales consideran que el software es de buena calidad y 33 % piensan que tienen una calidad aceptable.

**Palabras clave:** estimador de muestreo, simulador maderable, lenguaje unificado de modelado, plantación forestal comercial.

# **UNIFIED APPLICATION PROCESS IN THE DEVELOPMENT OF A SOFTWARE TO ESTIMATE INVENTORY AND GROWTH-YIELD TIMBER in EUCALYPTUS PLANTATIONS**

## **2.2. ABSTRACT**

Software was developed using the Unified Rational Process to estimate the inventory and wood growth/yield “EICRM” in commercial plantations of eucalyptus, established in The Choapas, Veracruz, and in Huimangillo, Tabasco, Mexico. The software allows to estimate the inventory across samplings (random simply, random stratified and reason – regression) and to project the wood stock by a system of equations of growth and performance. Modules allow adding, consulting and eliminating information, as well as exporting it to Microsoft Excel. The software validation was done using the 2012 inventory, with 976 temporary sites and a total of 32744 trees, distributed in 5896 ha, indicating a consistency between the results calculated by the company and the software. Besides, a quality test showed that 55 % of the factors present a level of good quality and that 45 % presents an acceptable one while 67 % of the final users consider that the software has good quality and 33 % express that it is acceptable.

**Key words:** sampling estimator, timber simulator, unified modeling language, commercial forest plantation.

### **2.3. INTRODUCCIÓN**

Las empresas dedicadas a las plantaciones forestales requieren de datos confiables para hacer un óptimo aprovechamiento de los recursos a través de una buena planeación que ayude a determinar cuándo, dónde y cuánta madera cortar; además de conocer y controlar variables como el volumen del inventario, las tasas de crecimiento, el flujo de caja, el valor actual neto y el valor de retorno sobre la inversión (Chiari *et al.*, 2008). Las actividades de inventariar el recurso y de predecir el crecimiento e incremento del mismo, son parte esencial en la administración de una plantación. Por lo tanto, el contar con una herramienta eficiente de inventario que determine el incremento-productividad a través del tiempo implementado en un buen sistema de cómputo facilitarían la administración de las plantaciones comerciales (Santiago *et al.*, 2013).

La estimación del inventario implica definir teóricamente las variables y estimadores que se van a medir, de manera que se facilite el trabajo en campo y proporcione información precisa y confiable (Rojo *et al.*, 2004). Para predecir el incremento y la productividad de una plantación, por lo general, se recurre al uso de modelos matemáticos; estos modelos expresan la realidad biológica a través de ecuaciones (Santiago *et al.*, 2013), conocidas como sistema de crecimiento y rendimiento maderable, las cuales se utilizan para proyectar componentes como la altura dominante, el área basal, la supervivencia residual (mortalidad) y el volumen total, en función de la edad y sus interrelaciones con el rodal (Galán *et al.*, 2008). Una vez definidos los modelos matemáticos, para facilitar su uso, se integran en un sistema de cómputo.

El desarrollo de este sistema requiere utilizar una metodología que cumpla con los requerimientos del usuario y de calidad. Para esto, el proceso unificado racional se ha convertido en un estándar industrial para procesos de software,

y se fundamenta en las mejores prácticas de desarrollo de software para minimizar las fallas y maximizar la productividad. A lo largo de los años se ha mejorado, aplicándose cada vez más en numerosos proyectos y organizaciones en dominios diferentes (Anwar, 2014).

Por lo expuesto anteriormente, resulta importante utilizar dichas herramientas e incorporarlas a los procesos que se realizan en las plantaciones, ya que permiten la disminución de tiempos de cálculo y errores humanos, así como, analizar y hacer proyecciones de los datos facilitando la toma de decisiones. El objetivo fue desarrollar un software de calidad aceptable que facilite y agilice el manejo de datos, el cálculo del inventario y la proyección del mismo, a través de tres métodos de muestreo y un sistema de crecimiento y rendimiento maderable para plantaciones comerciales de eucalipto.

## **2.4. MATERIALES Y MÉTODOS**

### **2.4.1. Software y hardware**

En el análisis, diseño y modelado de datos del sistema EICRM, se utilizó el software Edraw Max® (EdrawSoft, 2009), Microsoft Access® (Microsoft, 2010) y el lenguaje de estructurado de consulta SQL® (IBM, 2008); la base de datos se realizó con el gestor SQLite® (Hipp, 2013), con la ayuda de la interfaz gráfica de desarrollo Sqlitestudio® (Salawa, 2013). Para la codificación del software se recurrió al lenguaje de programación Java® (Sun Microsystems/Oracle Corporation, 2006), a través de la interfaz gráfica Netbeans IDE® (Sun Microsystems/Oracle Corporation, 2013).

Para el desarrollo del proyecto se utilizó una laptop con procesador Intel® Core™2 Duo CPU T6400 a 2.00 GHz, memoria RAM de 4.00 GB y sistema operativo de 32 bits.

### 2.4.2. Datos dasométricos

Se utilizaron datos obtenidos de un inventario de las plantaciones que se realizó en el 2012. Se inventarió un total de 120 predios, 143 contratos (subdivisión de los predios pertenecientes a diferentes dueños), 224 órdenes (subdivisiones de terreno de los contratos) y 976 sitios temporales de dimensiones fijas de 500 m<sup>2</sup> (de 20 m de ancho por 25 m de largo) distribuidos de forma sistemática con una separación entre ellos cada 200 m, en un área de 5896 ha; cada sitio tenía documentado el número de árboles, el diámetro normal y la altura total. De la totalidad de los sitios se cuantificaron 32744 árboles del género *Eucalyptus*, 32677 de *E. urophylla* y 67 de *E. grandis*, producidos por semilla y vegetativamente (clones).

### 2.4.3. Estimadores de muestreo

Los estimadores usados para el cálculo del inventario se muestran en los siguientes cuatro cuadros; el cálculo del muestreo aleatorio simple en el (Cuadro 2.1), el cálculo del muestreo aleatorio estratificado en el (Cuadro 2.2), los cálculos del muestreo de razón-regresión y, razón bajo estratificación (Cuadro 2.3) y (Cuadro 2.4) respectivamente.

**Cuadro 2.1.** Estimadores del Muestreo Simple Aleatorio.

Estimador	Ecuación
Media muestral	$\bar{y} = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n y_i$
Varianza de la variable en la muestra	$S_y^2 = \frac{\sum_{i=1}^n (y_i - \bar{y})^2}{n - 1}$
Varianza de la media	$S_{\bar{y}}^2 = \frac{S_y^2}{n} \left( \frac{N - n}{N} \right)$

---

Inventario o Población Total

$$\hat{T} = N\bar{y}$$

---

Tamaño de muestra

$$n = \frac{t_{n-1,(\alpha/2)}^2 N S_y^2}{B^2 N + S_y^2 t_{n-1,(\alpha/2)}^2}$$

---

$y_i$  = Volumen con corteza en  $m^3$  en el  $i$ -ésimo sitio de muestreo;  $N$  = Número total de unidades de muestreo en la población;  $n$  = Número de unidades incluidas en la muestra;  $B$  = Tamaño aceptable del error de estimación o de muestreo;  $t$  = Distribución  $t$  de Student.

---

**Cuadro 2.2.** Estimadores del Muestreo Aleatorio Estratificado.

Estimador	Ecuación
Unidades muestrales	$N = \sum_{h=1}^L N_h \quad ; \quad n = \sum_{h=1}^L n_h$
Estimadores muestrales	
Media muestral en el estrato $h$	$\bar{y}_h = \frac{1}{n_h} \sum_{i=1}^{n_h} \bar{y}_{h,i}$
Varianza muestral entre unidades muestrales del estrato $h$	$S_h^2 = \frac{\sum_{i=1}^{n_h} (y_{hi} - \bar{y}_h)^2}{n_h - 1}$
Varianza de la media muestral en el estrato $h$	$S_{\bar{y}_h}^2 = \frac{S_h^2}{n_h} \left( \frac{N_h - n_h}{N_h} \right)$
Total por estrato $h$	$\hat{T} = N_h \bar{y}_h$
Varianza del total por estrato	$S_{T_h}^2 = (N_h)^2 S_{\bar{y}_h}^2 = (N_h)^2 \frac{S_h^2}{n_h} \left( \frac{N_h - n_h}{N_h} \right)$
Estimadores poblacionales	

---

Media muestral de la población

$$\bar{y}_E = \sum_{h=1}^E \frac{N_h}{N} \bar{y}_h = \frac{1}{N} \sum_{h=1}^L N_h \bar{y}_h$$

---

Varianza de la media muestral de la población

$$S_{\bar{y}_E}^2 = \sum_{h=1}^L \left( \frac{N_h}{N} \right)^2 S_{\bar{y}_h}^2$$

---

Estimador del total de la población

$$\hat{T}_E = N \bar{y}_E = N \left( \frac{1}{N} \sum_{h=1}^L N_h \bar{y}_h \right) = \sum_{h=1}^L \hat{T}_h$$

---

Varianza del estimador total de la población

$$S_{\hat{T}_E}^2 = N^2 S_{\bar{y}_E}^2 = \sum_{h=1}^L N_h^2 S_{\bar{y}_h}^2 = \sum_{h=1}^L S_{\hat{T}_h}^2$$

---

Estimación del tamaño de muestra

$$n = \frac{(\sum_{h=1}^L N_h S_h)^2}{N^2 \frac{B^2}{t^2} + \sum_{h=1}^L N_h S_h^2}$$

---

$N_h$  =Número total de unidades muestrales en el estrato  $h$ ;  $L$  =Número total de estratos en la población;  $n_h$  =Número total de unidades muestrales en el estrato  $h$  incluidas en la muestra;  $y_{h,i}$  =Valor observado de la variable de interés  $y$  (volumen con corteza en  $m^3$ ) en la  $i$ -ésima unidad muestral en el  $h$ -ésimo estrato; Las demás variables ya fueron definidas.

---

**Cuadro 2.3.** Estimadores de Razón (proporción) y Regresión.

Estimador	Ecuación
Razón	$R = \frac{\mu_y}{\mu_x}$
Estimadores de Razón	
Estimador de Razón	$\hat{R} = \frac{\bar{y}}{\bar{x}} = \frac{\sum_{i=1}^n y_i}{\sum_{i=1}^n x_i}$
Media	$\bar{y}_R = \hat{R} \mu_x = \frac{\bar{y}}{\bar{x}} \mu_x$
Varianza de la Razón	$S_{\hat{R}}^2 = \frac{1}{\mu_x^2} \frac{S_u^2}{n} \left( 1 - \frac{n}{N} \right)$ $S_u^2 = \frac{\sum_{i=1}^n (y_i - \hat{R} x_i)^2}{n-1} = \frac{\sum_{i=1}^n y_i^2 + \hat{R}^2 \sum_{i=1}^n x_i^2 - 2\hat{R} \sum_{i=1}^n y_i x_i}{n-1}$

Varianza de la Media	$S_{\bar{y}_{\hat{R}}}^2 = \frac{S_u^2}{n} \left(1 - \frac{n}{N}\right)$
Tamaño de muestra	$n = \frac{t_{n-1,(\alpha/2)}^2 N S_u^2}{L_{\hat{R}}^2 \mu_x^2 N + t_{n-1,(\alpha/2)}^2 S_u^2}$

---

**Estimadores de Regresión**

---

Media	$\bar{y}_{REG} = \bar{y} + \beta(\mu_x - \bar{x})$
Pendiente	$\beta = \frac{\sum_{i=1}^n (y_i - \bar{y})(x - \bar{x})}{\sum_{i=1}^n (x - \bar{x})^2}$
Varianza de la Media	$S_{\bar{y}_{REG}}^2 = \frac{S_{xy}^2}{n} \left(1 - \frac{n}{N}\right)$ $S_{xy}^2 = \frac{\sum_{i=1}^n (y_i - \bar{y})^2 - \beta^2 \sum_{i=1}^n (x - \bar{x})^2}{n - 2}$
Tamaño de muestra	$n = \frac{t_{n-1,(\alpha/2)}^2 N S_{xy}^2}{L_{REG}^2 N + t_{n-1,(\alpha/2)}^2 S_{xy}^2}$

$\mu_y$ =Media poblacional de la variable de interés (principal);  $\mu_x$ =Media poblacional de la variable auxiliar;  $L_{\hat{R}}$ =Tamaño aceptable del error de estimación o de muestreo;  $L_{REG}$ =Tamaño aceptable del error de estimación o de muestreo respecto a  $\bar{y}_{REG}$ ; las demás variables ya fueron definidas.

**Cuadro 2.4.** Estimadores de Razón Estratificada.

Estimador	Ecuación
Media	$\bar{y}_{\hat{R}c} = \frac{\sum_{h=1}^L W_h \bar{y}_h}{\sum_{h=1}^L W_h \bar{x}_h} \mu_x$
Varianza	$S_{\bar{y}_{\hat{R}c}}^2 = \frac{1}{N} \sum_{h=1}^L W_h \left( \frac{N_h - n_h}{n_h(N_h - 1)} \right)$ $\times \left( \sum_{i=1}^{n_h} y_{ih}^2 + \hat{R}_c^2 \sum_{i=1}^{n_h} x_{ih}^2 - 2\hat{R}_c \sum_{i=1}^{n_h} y_{ih} x_{ih} \right)$ $\hat{R}_c = \frac{\sum_{h=1}^L W_h \bar{y}_h}{\sum_{h=1}^L W_h \bar{x}_h}$
Tamaño de muestra	$S_h^2 = \frac{\sum_{i=1}^{n_h} (y_{h,i} - R_c x_{h,i})^2}{n_h - 1}$

#### 2.4.4. Modelos de cubicación

El volumen de los árboles en pie se estimó con dos ecuaciones de volumen total con corteza ajustados para la zona por (Roldan, 2013), a parte se generaron dos ecuaciones para calcular el volumen comercial (Cuadro 2.5).

**Cuadro 2.5.** Modelos para la cubicación del arbolado.

Variable	Ecuación
Volumen total con corteza árboles de semilla	$VT_s = 0.000067 D^{1.694084} H^{1.032558} E^{0.038023}$
Volumen total con corteza árboles clonados	$VT_c = 0.0000618 D^{1.694084} H^{1.032558} E^{0.127879}$
Volumen comercial con corteza árboles de semilla	$VC_s = 0.000067 D^{1.694084} H^{1.032558} E^{0.038023}$ – $0.000024 d^2(H - h)$
Volumen comercial con corteza árboles clonados	$VC_c = 0.0000618 D^{1.694084} H^{1.032558} E^{0.127879}$ – $0.0000255 d^2(H - h)$

D=diámetro normal en m; H=altura total del árbol en m; E=edad en años; h=altura a un diámetro establecido en m;  $d^2$ =diámetro cuadrático en cm.

#### 2.4.5. Sistema de ecuaciones del modelo de crecimiento y rendimiento

El conjunto de ecuaciones utilizadas pertenecen a un modelo explícito hecho especialmente para estas plantaciones realizado por (Roldan, 2013); este modelo se encarga de proyectar componentes de altura dominante, área basal, supervivencia residual (mortalidad) y volumen total de la plantación en función de la edad y de sus interrelaciones como componentes del rodal (Cuadro 2.6).

**Cuadro 2.6.** Ecuaciones del modelo de crecimiento y rendimiento maderable.

Variable	Ecuación
Altura dominante	$A = \frac{34.8558}{1 + e^{1.3048 \times E^{-1.2163}}}$
Área basal	$AB = e^{-4.9133} \times e^{\left(\frac{-0.7748}{E}\right)} \times A^{1.1893} \times N^{0.6218}$
Número de árboles sobrevivientes	$N_2 = N_1 \times e^{-0.0299 \times (E_2 - E_1)}$
Volumen total	$V = 0.8294 \times AB^{0.9923} \times A^{0.7357}$
Diámetro cuadrático	$DQ = \sqrt{\frac{40,000}{\pi} \times \frac{AB}{N}}$

A=altura dominante en m; AB=área basal en m<sup>2</sup>ha<sup>-1</sup>; N<sub>2</sub>=número de árboles sobrevivientes por ha a la E<sub>2</sub> a partir de la edad de referencia E<sub>1</sub>; V=volumen total m<sup>3</sup>ha<sup>-1</sup>; E=edad en años; DQ=diámetro cuadrático obtenido de manera implícita en cm; E<sub>1</sub>=edad inicial; E<sub>2</sub>=edad final.

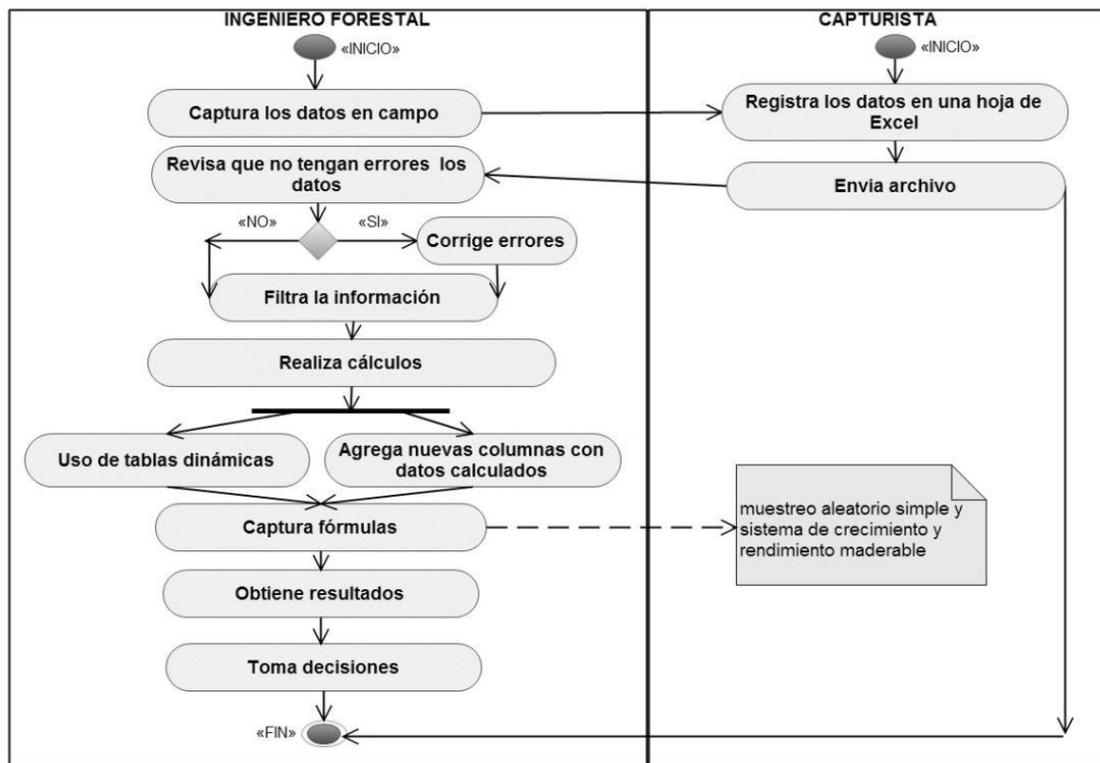
#### 2.4.6. Desarrollo de software

El software EICRM, se construyó bajo el Proceso Unificado Racional (Rational Unified Process, “RUP”) y el Lenguaje Unificado de Modelado (Unified Modeling Language, “UML”). El Proceso Unificado de Desarrollo de Software es un conjunto de actividades usadas para transformar los requisitos de un usuario en un software; cuenta con tres características claves: dirigido a casos de uso, centrado en la arquitectura, iterativo e incremental (Pereira, 2011). Este proceso involucra cuatro fases (inicio, elaboración, construcción, transición) y nueve disciplinas, las cuales son repetibles en cada fase (modelado del negocio, requisitos, análisis y diseño, implementación, pruebas, despliegue, gestión del cambio y configuraciones, gestión del proyecto, entorno). A las seis primeras disciplinas se les conoce como flujos de trabajo del proceso y a las tres últimas como flujos de trabajo de soporte (Addetla *et al.*, 2014).

La reciprocidad que tiene RUP con UML es muy estrecha, ya que el primero establece las actividades y los criterios para construir un sistema desde el máximo nivel de abstracción (ideas), hasta el nivel más concreto (software); mientras que el segundo ofrece una perspectiva gráfica para representar y documentar los modelos en cada iteración (Pereira, 2011). Ambas metodologías se usaron de forma complementaria para desarrollar las fases y los diagramas del software.

### 2.4.7. Análisis del sistema

El sistema usado por la empresa correspondía a una aplicación semiautomatizada de ambos procesos, los cuales eran tardados en la obtención, la captura y el procesamiento de la información (Figura 2.1).



**Figura 2.1.** Diagrama de actividad del sistema anterior. En él se observa a los participantes (ingeniero forestal y capturista) además de las tareas realizadas por cada uno.

#### **2.4.8. Modelado de datos**

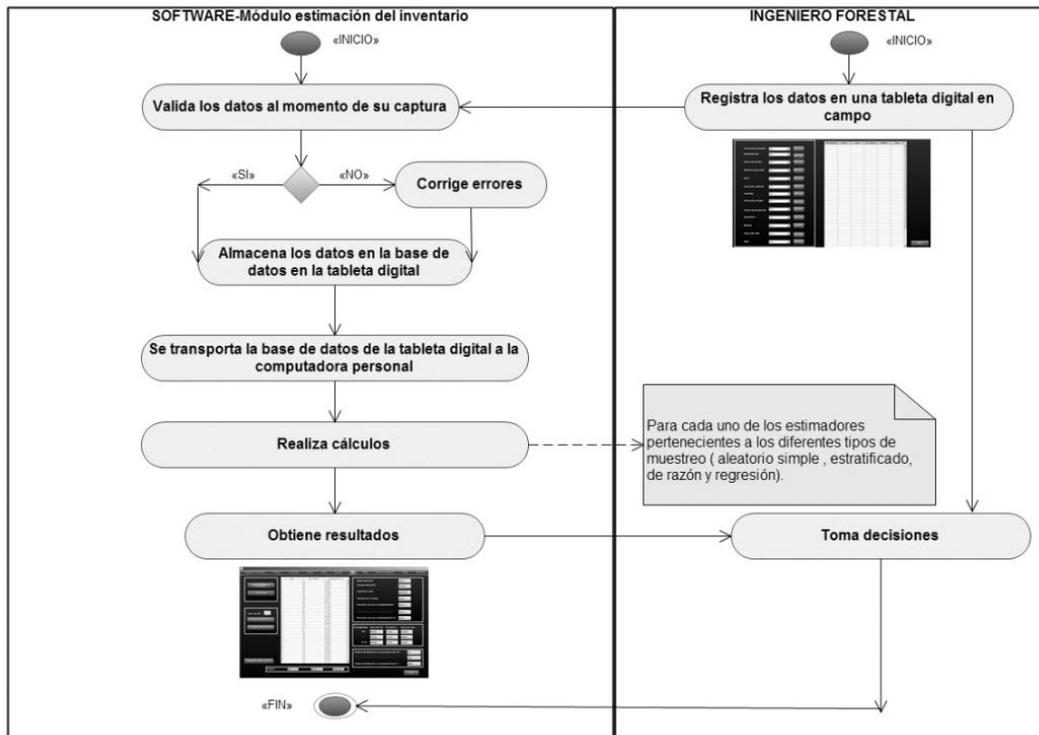
Las aplicaciones de software requieren de un proceso disciplinado en el diseño de la información almacenada, la base de datos. En la actualidad se comercializan productos que soportan el modelo relacional, gestores de objetos y sistemas de gestión relacionales (Hernández, 2004). El modelo relacional se crea a partir un conjunto de tablas (relaciones), a las cuales se les aplican operaciones de normalización con el objeto de construir un esquema óptimo que permita tener una visión clara de la información de un problema o negocio. Su construcción se fundamenta en la independencia física y lógica, flexibilidad, uniformidad y sencillez; mientras que la estructura se establece a través de las (tablas, hileras, columnas, grado, cardinalidad y dominio) (Codd, 1970).

El diseño de la información almacenada para el software, consistió en reestructurar un archivo Microsoft Excel con los datos del inventario 2012 y convertirlo a un modelo relacional. Este proceso requirió la separación de las columnas del archivo original en agrupaciones semejantes de datos para diseñar las afinidades. Posteriormente, la información de cada grupo se envió a una hoja de MS Excel, donde se hizo el filtrado de datos a través de tablas dinámicas; en el caso de filtrados más complejos se recurrió al uso de Microsoft Access y el lenguaje de consulta estructurado SQL (por sus siglas en inglés Structured Query Language). Después, se ordenó y se guardó la información en archivos delimitados por comas, los cuales se exportaron a cada una de las afinidades de la base de datos en SQLite, a través de la interfaz gráfica de desarrollo Sqlitestudio.

#### **2.4.9. Descripción del sistema**

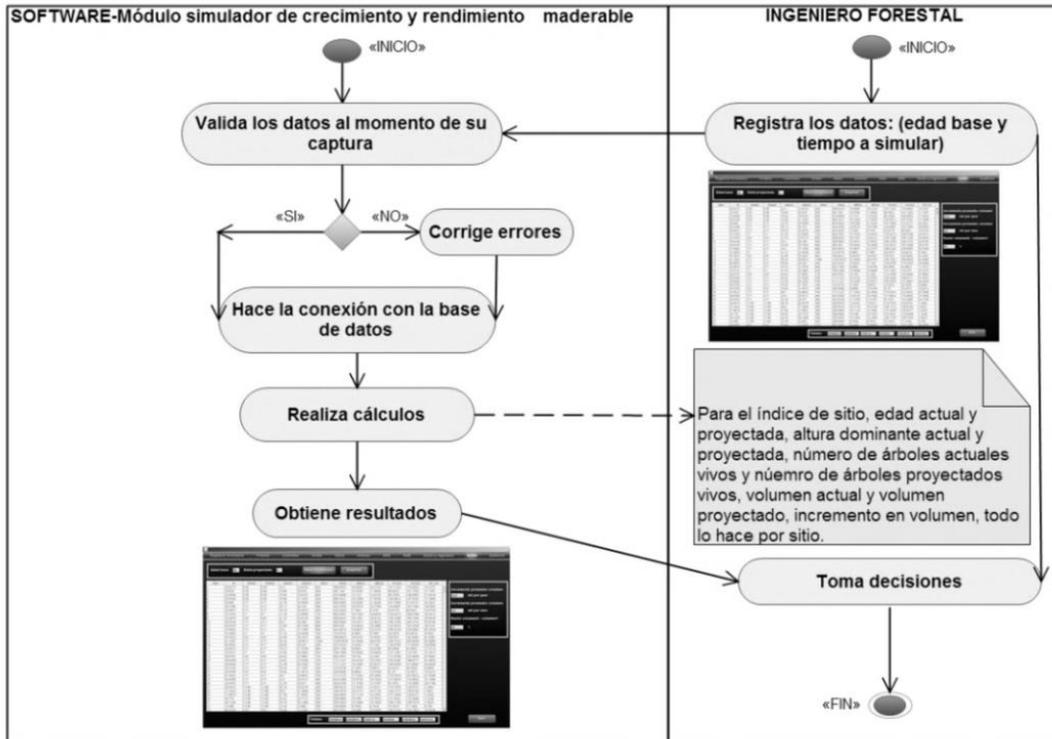
El sistema EICRM, cuenta con dos módulos, el cálculo del inventario y el sistema de proyección maderable, ambos fueron rediseñados; el primero de ellos se adecuó para tener una mejor aproximación de las existencias en la

plantación, esto se hizo al agregar más tipos de muestreo para tener una mayor amplitud en la estimación y toma de decisiones en menor tiempo y sin tanta manipulación de datos (Figura 2.2).



**Figura 2.2.** Diagrama de actividad para el módulo del inventario. En él se observan los pasos que se deben seguir para estimar la cantidad total de madera en las plantaciones.

El segundo módulo, hace la proyección maderable de la plantación proporciona una estimación futura de los recursos y deja listos los datos para hacer una planeación adecuada de los mismos (Figura 2.3). En ambos casos, el propósito inicial fue implementar la simplicidad, la eficiencia y la facilidad de uso de la información en el sistema.



**Figura 2.3.** Diagrama de actividad del módulo de simulación. En él se observan los pasos que se deben seguir, para predecir las existencias maderables en las plantaciones.

## 2.4.10. Implementación

La codificación de los módulos se hizo a través del lenguaje java. En total se codificaron quince clases, diez de ellas para el procesamiento de datos y cálculos y cinco para hacer funcionar el sistema. La interfaz es fácil de usar, con opciones para navegar entre pantallas y presentar resultados en forma sencilla y entendible.

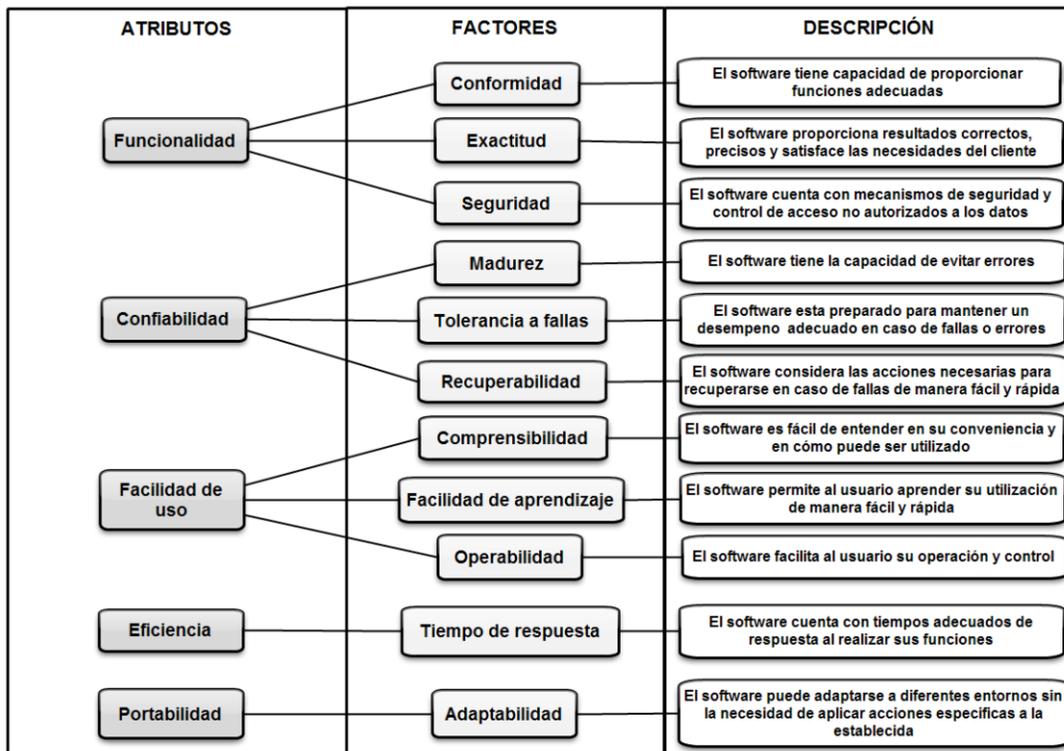
## 2.4.11. Pruebas

### 2.4.11.1. Validación numérica

La validación de los módulos se realizó al comparar los resultados obtenidos con el proceso empleado por la empresa, con los resultados obtenidos en el software.

### 2.4.11.2. Calidad del software

Para la evaluación del software se aplicó la metodología propuesta por Macías *et al.* (2010), la cual se centra en el concepto de calidad orientada al uso y satisfacción del usuario, sugerida por Ramani (2007). Esta técnica integra los atributos de los modelos de calidad (McCall e ISO 9126) y establece qué factores deben evaluarse, cómo deben medirse y en qué términos (Figura 2.4). Para aplicar la prueba se crearon 22 preguntas y una escala de respuestas posibles (1 “Excelente” a 5 “Mala”).



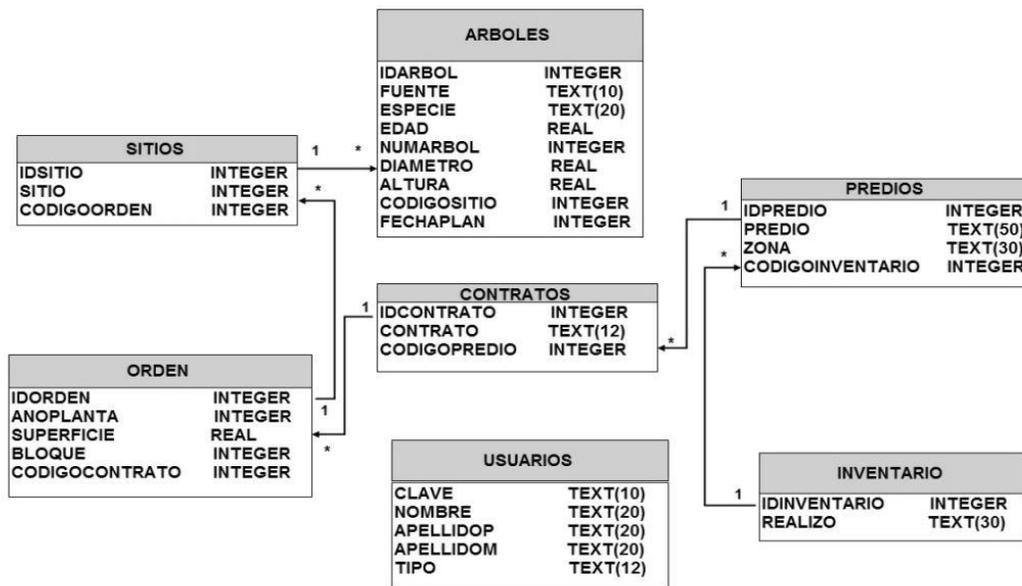
**Figura 2.4.** Unificación de la calidad por medio de los modelos (McCall e ISO 9126). Considerando cinco atributos y once factores, destinados al usuario, para evaluar la calidad de software.

El cuestionario se aplicó a 12 usuarios finales quienes estaban capacitados en la realización de los cálculos y el análisis de resultados, los cuales fueron seleccionados de acuerdo a los siguientes criterios (conocimiento general sobre

uso de software y conocimiento sobre la temática del software). Los resultados obtenidos de los cuestionarios se analizaron mediante estadística descriptiva con base en los factores y escalas definidos; los valores de las medias se calificaron de acuerdo con las siguientes categorías de calidad, para valores entre 1.000 y 1.500 como “Excelente”, de 1.501 a 2.500 como “Buena”, de 2.501 a 3.500 como “Aceptable” y cualquier valor superior a 3.500 fue considerado como “No aceptable”.

## 2.5. RESULTADOS Y DISCUSIÓN

La base de datos del sistema “EICRM” fue diseñada bajo el esquema del modelo relacional, se aplicó el proceso de normalización para evitar la duplicidad de datos y garantizar la integridad de la información. La aplicación correcta de este modelo propicia que el uso de los datos pueda ser utilizado de forma más eficiente (Figura 2.5).



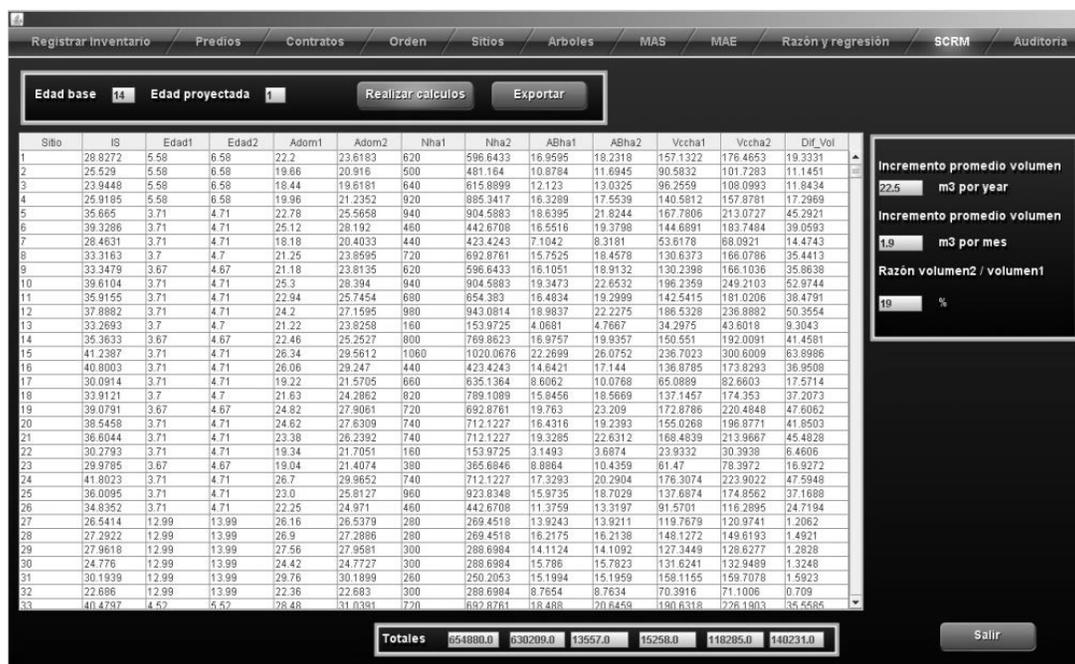
**Figura 2.5.** Modelo relacional de base de datos. Incluye siete afinidades (Árboles, Sitio, Pedios, Contratos, Orden, Inventario y Usuarios) y cinco relaciones (uno a varios).

La presentación de los cálculos del inventario y el simulador maderable se realizó a través de pantallas gráficas de acceso cómodo, visualización simple y de fácil uso. La pantalla del inventario contiene las opciones para registrar información (predios, contratos, órdenes, sitios y árboles) y para calcular los totales, estimadores e inventario de las variables evaluadas para los cuatro tipos de muestreo (Figura 2.6).



**Figura 2.6.** Pantalla del módulo de estimación del inventario indicando los estimadores del muestreo aleatorio simple del sistema EICRM.

La pantalla del simulador muestra en una tabla los valores iniciales y proyectados de las variables (índice de sitio, edad, área basal, mortalidad y volumen) en un periodo de tiempo elegido, que puede ser en años o meses (Figura 2.7).



**Figura 2.7.** Pantalla del módulo de proyección del crecimiento y rendimiento maderable del sistema EICRM. En ella se observan los valores (iniciales y finales) de las variables, después de hacer la proyección.

### 2.5.1. Validación experimental

Los valores obtenidos a través del proceso aplicado por la empresa corresponden a los mismos valores obtenidos en el software EICRM. En un estudio semejante entre un proceso semiautomatizado y un software, Zavala *et al.* (2014) encontraron que en ambos casos no hubo diferencias significativas entre los resultados numéricos de los procesos. Esto se debe a que en la transición de un proceso a otro las conversiones de métodos y datos se hicieron de forma correcta (Cuadro 2.7).

**Cuadro 2.7.** Resultados de los estimadores aplicados por la empresa y el software.

Tipo de muestreo	Media	Var. Media	Inventario (m <sup>3</sup> )	Precisión (%)	n (5%)
Aleatorio Simple	6.059	0.010	714 607	3.2	1018

Tipo de muestreo	Media	Var. Media	Inventario (m <sup>3</sup> )	Precisión (%)	n (5%)
Estratificado Edad	6.733	0.011	794 066	3.0	724
Estratificado Predio	6.561	0.012	773 761	3.0	545
Estratificado Orden	6.648	0.009	783 741	3.0	531
Razón Volumen Área Basal <sup>-1</sup>	6.454	0.001	761 106	1.1	1052
Razón Volumen Edad <sup>-1</sup>	7.296	0.018	860 484	3.7	1014
Regresión Volumen Área Basal <sup>-1</sup>	6.579	0.0008	775 929	0.8	704
Regresión Volumen Edad <sup>-1</sup>	6.401	0.0089	754 962	2.9	1012
Razón Estratificada Volumen Edad <sup>-1</sup>	6.733	0.0001	794 012	0.3	723
Razón Estratificada Volumen Área basal <sup>-1</sup>	6.733	0.00001	794 012	0.1	723

n=tamaño de muestra, Var=varianza.

### 2.5.2. Calidad del software

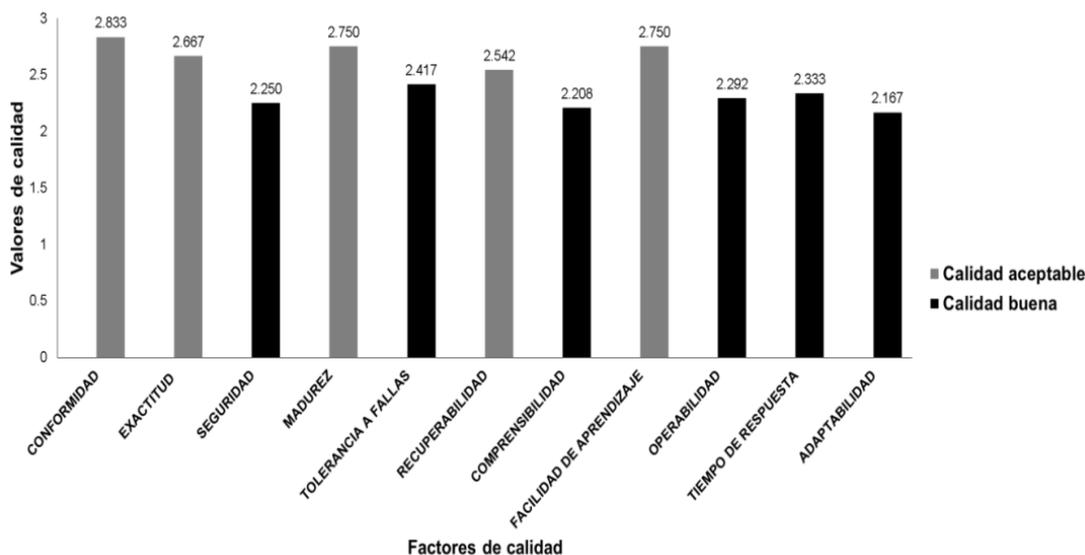
Los resultados de la prueba de la calidad demostraron que el valor máximo del promedio correspondió al factor de conformidad, 2.883 y el valor mínimo 2.167, para el factor de adaptabilidad; esto significa que el factor “mejor calificado” es aquel que tiene el valor más pequeño (Cuadro 2.8).

**Cuadro 2.8.** Estadísticos obtenidos de los once factores de calidad.

Factor de calidad	Media	Varianza	Desviación estándar
Conformidad	2.833	1.275	1.129
Exactitud	2.667	1.101	1.049
Seguridad	2.250	1.326	1.152

Madurez	2.750	1.326	1.152
Tolerancia a fallas	2.417	1.471	1.213
Recuperabilidad	2.542	1.042	1.021
Comprensibilidad	2.208	1.042	1.021
Facilidad de aprendizaje	2.750	1.152	1.073
Operabilidad	2.292	1.259	1.122
Tiempo de respuesta	2.333	1.362	1.167
Adaptabilidad	2.167	1.275	1.129

De los once factores de calidad se encontró que 55 % de los mismos presenta un nivel de calidad buena y que 45 % cumple con una calidad aceptable (Figura 2.8). Macías *et al.* (2010) encontraron que al integrar al usuario en la evaluación, se incrementó la calidad del software significativamente, en 10 de los 11 factores analizados.



**Figura 2.8.** Categorías de calidad por factor. Los valores por encima de las barras representan la media de cada factor de calidad, se puede apreciar que seis de ellos se encuentran en un nivel de calidad buena y los otros cinco tienen una calidad aceptable.

En tanto, la evaluación hecha por los usuarios finales al software, con los mismos factores de calidad, determinaron que 67 % el sistema es de buena calidad y 33 % que tiene una calidad aceptable (Cuadro 2.9).

**Cuadro 2.9.** Resultados de la calificación de los usuarios finales sobre la calidad del software.

Usuarios finales	Media	Varianza	Desviación estándar	Categoría de calidad
Usuario 1	2.909	1.229	1.109	Aceptable
Usuario 2	2.318	1.084	1.041	Buena
Usuario 3	2.455	1.307	1.143	Buena
Usuario 4	2.818	0.823	0.907	Aceptable
Usuario 5	2.455	1.403	1.184	Buena
Usuario 6	2.000	0.952	0.976	Buena
Usuario 7	2.273	1.541	1.241	Buena
Usuario 8	2.364	1.100	1.049	Buena
Usuario 9	2.545	1.498	1.224	Aceptable
Usuario 10	2.864	1.457	1.207	Aceptable
Usuario 11	2.455	1.022	1.011	Buena
Usuario 12	2.227	1.327	1.152	Buena

El uso de la metodología RUP por los desarrolladores, se basa principalmente en dos razones: primero, proporciona una buena documentación de sus actividades y, segundo, tiene un enfoque iterativo. Ambas dan consistencia al desarrollo de aplicaciones, pero para tener un proceso de certificación adecuado se debería evaluar la calidad al final de cada iteración, esto aumentaría en gran medida la calidad del software y garantizaría cero defectos (Ahmad *et al.*, 2011). Además, la metodología RUP permite a los desarrolladores seleccionar y desplegar solamente los componentes de procesos que sean necesarios y el uso de iteraciones aumenta, en gran medida, la calidad del software producido, (Anwar, 2014). La mayoría de estos procesos se centran principalmente, en el cumplimiento de las especificaciones técnicas y de procesos, haciendo a un lado la usabilidad del producto y desechando los beneficios significativos, como el aumento de la eficiencia, mejora la productividad, reduce los errores y el entrenamiento y, mejora la aceptación (Ramani, 2007). Por lo tanto, el éxito funcional y económico está directamente relacionado con la calidad de los requisitos, si estos se adicionan, se suprimen

o modifican; impactan directamente en el costo, el tiempo y la calidad del producto final.

Nirpal y Kale (2011), señalan que una métrica es la piedra angular en la evaluación y la mejora de un software, que el nivel de satisfacción del cliente es el indicador preferencial de calidad; por tanto, deben utilizarse en la fase temprana del desarrollo, de modo que ayude a detectar y corregir errores de requisitos y evitar errores que puedan surgir en las fases posteriores (Dhawan, 2012). Las métricas pueden identificar problemas potenciales de errores y disminuir costes de desarrollo, siempre y cuando estén bien diseñadas con objetivos documentados (Yadav *et al.*, 2011) y encaminadas hacia el uso de prototipos y de los usuarios (García *et al.*, 2013). Finalmente, es importante considerar los factores de calidad, como la integridad, la corrección, la adaptabilidad y la comprensibilidad. (Haleem, 2013; Nazir *et al.*, 2010), para la definición adecuada en el nivel de calidad del software.

## **2.6. CONCLUSIONES**

De acuerdo con los resultados obtenidos, se encontró que los módulos del inventario y el simulador, son confiables en sus estimaciones. En el caso del inventario la implementación de más estimadores permitió al usuario visualizar diferentes escenarios y tomar la mejor decisión probable, mientras que el simulador ofreció una proyección del volumen proporcionando a los usuarios una mejor perspectiva del comportamiento de la plantación. También se comprobó que al tomar en cuenta al usuario en la evaluación del software, este representa un factor significativo en la obtención de la calidad del mismo. La calidad del software se estableció en un nivel entre bueno y aceptable de entre todos los factores analizados resultando mayoritariamente bueno, es decir, satisface las necesidades esenciales requeridas por el usuario final. Esto puede indicar que los usuarios ponen especial énfasis en ciertos aspectos que en ocasiones los desarrolladores tienden a omitir. Finalmente el proceso implícito

que tiene el software EICRM para capturar, almacenar y procesar la información, mejoró al proceso anterior en tiempo y administración de datos.

## **CAPÍTULO III. INTERFAZ MÓVIL PARA LA CAPTURA DE DATOS DE INVENTARIO EN PLANTACIONES DEL GÉNERO (*Eucalyptus*) UTILIZADOS POR EL SOFTWARE “EICRM”**

### **3.1. RESUMEN**

Se construyó una aplicación móvil utilizando la Metodología Desarrollo de Aplicaciones Móviles “MDAM” para capturar y almacenar datos en campo en plantaciones comerciales del género *Eucalyptus*, establecidas en Las Choapas, Veracruz y en Huimanguillo, Tabasco, México. La aplicación provee una base de datos, la cual se transfiere para su análisis mediante un puerto USB (Bus de serie Universal). Los datos transferidos son utilizados por el software “EICRM” encargado de estimar el inventario y el crecimiento-rendimiento maderable de la plantación. La aplicación se desarrolló bajo un ambiente Android y se implementó en una tableta digital 10,1” (pantalla de 1280 x 800), mientras que la evaluación de calidad se basó en las normas ISO 9126, 14958-5 y un cuestionario con 20 ítems y 6 variables (funcionalidad, confiabilidad, portabilidad, eficiencia, mantenibilidad y usabilidad) estructurado con una escala tipo Lickert (excelente, buena, regular, deficiente y mala). Los resultados demostraron que el promedio de los seis atributos de calidad, para la media 2.546 y 2.583 para la mediana, están en el rango de buena calidad, mientras que los promedios de la media y mediana para la evaluación de los usuarios, 1.9 y 2.6 respectivamente, también se encuentran en el rango de calidad buena.

**Palabras clave:** aplicación móvil, desarrollo de aplicaciones móviles, plantación forestal comercial, inventario forestal.

## **INTERFACE FOR MOBILE DATA ENTRY IN PLANTATION INVENTORY OF KIND (*Eucalyptus*) USED BY THE SOFTWARE "EICRM"**

### **3.2. ABSTRACT**

A mobile application was constructed using the Methodology for the Development of Mobile Applications "MDAM" to capture and to store information in field in commercial plantations of the kind *Eucalyptus*, established in The Choapas, Veracruz and in Huimanguillo, Tabasco, Mexico. The application provides a database, which is transferred for his analysis by means of a port USB (Universal Serial Bus). The transferred information is used by the software "EICRM" entrusted to estimate the inventory and the providing useful wood growth - performance of the plantation. The application was developed under an Android environment and WXGA implemented in a digital tablet with a 10,1 " (1280 x 800) screen to have facility of use. Once developed, the applications quality was evaluated with a methodology based on the ISO procedure 9126 and 14958-5 through a test conformed by 20 articles and 6 variables (functionality, reliability, portability, efficiency, maintenance and use facility) structured to a scale of Lickert type (excellent, good, regular, deficient and bad). The results demonstrated that the average of the six attributes of quality 2.546 for the average, and 2.583 for the median, are in the range of good quality, whereas the averages for the evaluation of the users, 1.9 and 2.6 respectively, also they find in him range of good quality.

**Key words:** mobile application, development of mobile applications, forest commercial plantation, forest inventory.

### 3.3. INTRODUCCIÓN

En el manejo de plantaciones forestales se requiere de una diversidad de información que indique las existencias actuales, su incremento y rendimiento o productividad y las relaciones intrínsecas entre los diversos componentes de los ecosistemas (Návar, 2010). Por lo tanto, el éxito de las plantaciones, cuando su objetivo es la producción maderable, se basa en el aumento continuo de sus dimensiones: altura, diámetro, área basal y volumen que determina su crecimiento en un periodo de tiempo específico. Estos datos sirven para aplicar un manejo silvícola, el cual es importante para promover el crecimiento de los árboles y así obtener un mayor volumen maderable de buena calidad y en el menor tiempo posible (Pérez *et al.*, 2012).

Por tanto, es importante estar monitoreando constantemente las condiciones del recurso, a través de inventarios; los cuales proporcionen información para conocer el comportamiento de la plantación a través del tiempo. La estimación de un inventario para una plantación implica, definir con anticipación las variables que se van a medir y sus estimadores lo cual hará que se facilite el trabajo en campo y se proporcione información precisa y confiable al proceso (Rojo *et al.*, 2004). En este sentido, la obtención de los datos en campo resulta ser una tarea complicada y laboriosa de realizar y, la recopilación de los mismos debe ser confiable para alcanzar un óptimo aprovechamiento de los recursos y así realizar una buena planeación que ayude a determinar el cuándo, dónde y cuánta madera cortar; además de conocer y controlar variables como el volumen del inventario, las tasas de crecimiento y los datos dasométricos en general (Chiari *et al.*, 2008).

La forma más común para recopilar información dasométrica para un inventario, ha sido mediante el uso de formatos en papel, en los cuales se registran los valores de las variables y posteriormente son capturados a una computadora y ser procesados. En la actualidad con el avance tecnológico se

han venido utilizando diferentes tipos de dispositivos analógicos y digitales para realizar esta tarea, haciendo que el proceso de captura sea más fácil y eficiente. En consecuencia, si existe una apropiada obtención de datos en campo, esto representará un alto grado de éxito para los posteriores procesos, ya que se contara con la confiabilidad, certeza y la posibilidad de cometer la menor cantidad de errores.

Tomando en cuenta este contexto, el siguiente trabajo se hizo con la finalidad fue desarrollar una interfaz para un dispositivo móvil que apoye en la captura los datos en campo para estimar el inventario de una plantación de eucalipto.

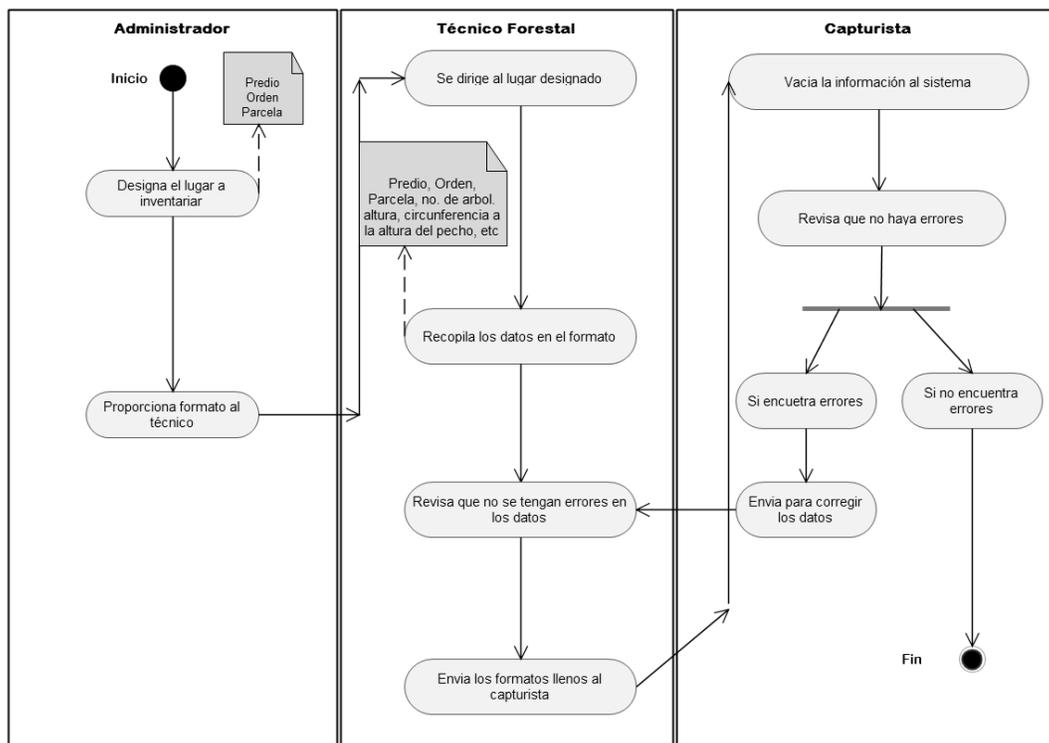
### **3.4. MATERIALES Y MÉTODOS**

#### **3.4.1. Herramientas para la construcción de la aplicación**

La interfaz se creó utilizando la Metodología para el Desarrollo de Aplicaciones Móviles, “MDAM” y el Lenguaje Unificado de Modelado (Unified Modeling Language”UML”). MDAM, es una metodología que está construida bajo cinco fases (análisis, diseño, desarrollo, pruebas de funcionamiento y entrega) y 16 tareas las cuales se encuentran distribuidas entre las fases de la siguiente manera: análisis (obtención de requerimientos, clasificación de requerimientos y personalización del servicio), diseño (definición del escenario, estructuración del software, definición de tiempos y asignación de recursos), desarrollo (codificación, pruebas unitarias, documentación del código y codificación de ayuda), pruebas de funcionamiento (emulación y simulación, dispositivos reales y evaluación) y finalmente entrega (manuales y distribución) (Gasca *et al.*, 2014). El lenguaje unificado de modelado (UML), tiene un papel esencial en la metodología, ya que es utilizado en las fases de análisis y diseño para describir la estructura y funcionamiento del software.

### 3.4.2. Análisis de la aplicación

A través de una entrevista realizada con la empresa, se obtuvieron los requisitos de la aplicación (interfaz). En primera instancia, se recurrió a detectar los problemas que se tienen con el proceso actual (Figura 3.1), en esta búsqueda se encontró que la captura de datos en campo se hace a través de un formato en papel. El uso incorrecto de este, propicia que los trabajadores cometan errores como: pérdida y daños en los formatos, duplicación del trabajo (primero recopilar y después capturar) e ilegibilidad de los datos.



**Figura 3.1.** Procedimiento actual para la recopilación de datos en campo.

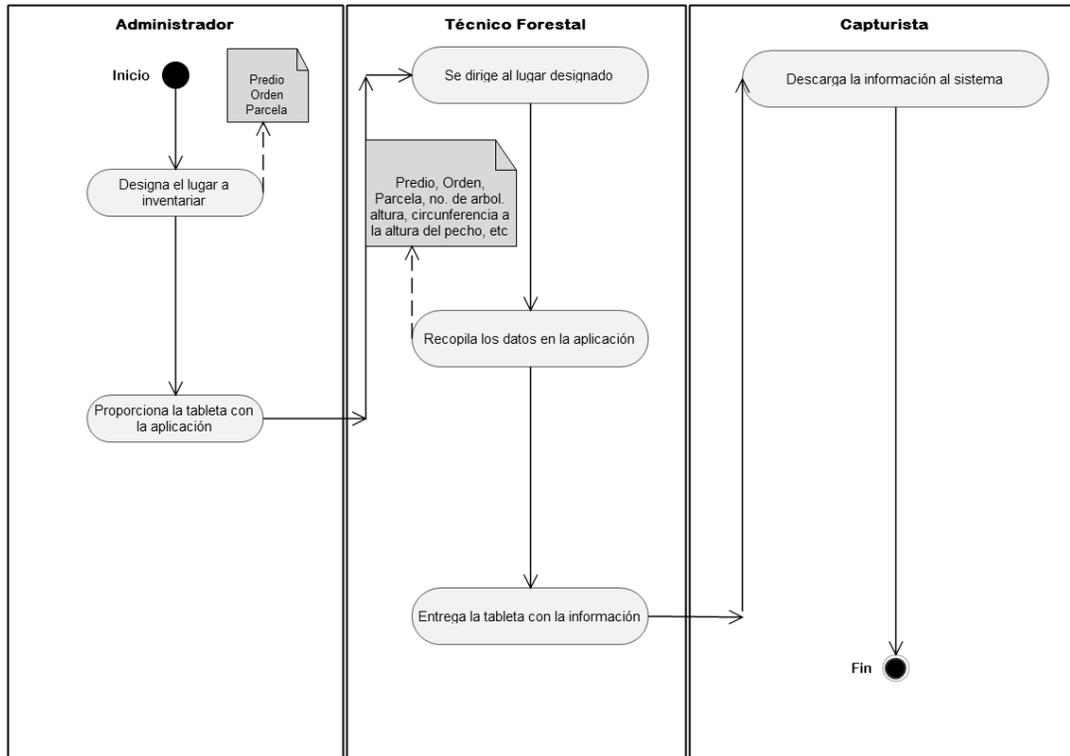
Posteriormente, se identificaron los requisitos o necesidades de información de la empresa, la cual definió que el nuevo proceso debería de ser más eficiente, es decir, evitar en lo posible los errores antes mencionados para lo cual se

propuso usar las tecnologías móviles como (teléfonos celulares y tabletas digitales) y así facilitar los procesos de captura-almacenamiento de los datos.

Por último, se establecieron los requerimientos funcionales de la aplicación, esto se hizo de manera conjunta con los usuarios de la empresa considerando las siguientes tareas: captura de datos, almacenamiento (guardar, eliminar) y las siguientes condiciones: facilidad de uso y un diseño sencillo; la primera de ellas, sugiere que la manipulación de la interfaz no cause problemas y la segunda propone, un orden lógico de los datos y una agradable presentación de la aplicación.

### **3.4.3. Diseño de la aplicación**

En esta fase, la primera tarea realizada fue definir el escenario, para este tipo de aplicación se requirió de un contexto fuera de línea; es decir, los procesos no necesitan estar conectados a una aplicación central o a un protocolo para funcionar, sino que estos se realizan directamente en el dispositivo móvil. El diseño de la aplicación se efectuó mediante el lenguaje unificado de modelado (UML) y se realizaron los diagramas de clases y actividades. El diagrama de clases, describe la estructura de la base de datos, y el diagrama de actividades explica el funcionamiento entre el usuario y la interfaz (Figura 3.2).



**Figura 3.2.** Proceso de recopilación de datos en campo mediante la aplicación.

Las herramientas utilizadas en el desarrollo se eligieron de forma específica para cada una de las fases. En las etapas de análisis y diseño, se recurrió al software Edraw Max® (EdrawSoft, 2009); la base de datos se realizó con el gestor SQLite® (Hipp, 2013), con la ayuda de la interfaz gráfica de desarrollo Sqlitestudio® (Salawa, 2013). Para la fase de desarrollo la codificación se efectuó mediante la interfaz gráfica AndroidStudio IDE® (Sun Microsystems/Oracle Corporation, 2013).

En lo que corresponde al hardware, para la implementación de la interfaz se utilizó una laptop con procesador Intel® Core™2 Duo CPU T6400 a 2.00 GHz, memoria RAM de 4.00 GB, sistema operativo de 32 bits y una tableta digital ICONIA TAB A510 con sistema operativo Android™ con procesador móvil NVIDIA® Tegra™ 3 con CPU Quad-Core ARM® Cortex™ A9, memoria flash de 32 GB, 1 GB de RAM, GPS, Wi-Fi IEEE 802.11b/g/n, Bluetooth® 2.1+EDR,

dispositivo USB, batería recargable de polímeros de litio:9800 mAh (36,26 Wh), pantalla 10,1" WXGA (1280 x 800) TFT 262K LCD.

#### **3.4.4. Desarrollo de la aplicación**

La interfaz se construyó tomando en cuenta un formato de papel que utilizan las brigadas que participan en los inventarios forestales para capturar los datos en campo. Las variables presentes en dicho formato se eligieron para crear una interfaz consistente con la lógica del mismo y representarlo de forma semejante en el dispositivo móvil. Para la base de datos se consideró el diseño del modelo relacional hecho para el software "EICRM" que estima el inventario y el crecimiento-rendimiento maderable para la misma empresa, dicho modelo se transformó a partir del diagrama de clases realizado en la fase de diseño. La finalidad de utilizar la misma base de datos fue para que haya compatibilidad al enviar la información del dispositivo móvil a la computadora, que es donde se encuentra instalado el software EICRM.

#### **3.4.5. Pruebas de funcionamiento**

Se aplicaron las siguientes actividades: emulación y simulación, funcionamiento en dispositivos reales y evaluación de la aplicación. Para la primera tarea se realizan pruebas simulando el escenario y emulando el dispositivo móvil, explorando todas las utilidades y funciones de la aplicación, introduciendo diferentes datos, inclusive datos erróneos, para medir la funcionalidad y el nivel de robustez de la aplicación, esto se hizo de forma constante a través de todo el proceso de codificación.

La comprobación del funcionamiento del dispositivo real se efectuó tres veces en el transcurso de su construcción; al inicio, a la mitad y al final de la codificación. Por otro lado, la evaluación se llevó a cabo cuando quedó terminada la aplicación, para ello se usó la metodología propuesta por Benítez

y Ramírez (2013), la cual está basada en las normas ISO 9126 y 14958 apartado 5. La metodología, evalúa la calidad de las tecnologías flexibles mediante criterios externos e internos a medir. Para su aplicación se conformó un cuestionario con 20 ítems y seis variables o atributos -funcionalidad, confiabilidad, portabilidad, eficiencia, mantenibilidad y usabilidad (Figura 3.3)- estructurándose con una escala tipo Lickert con los valores de (excelente, buena, regular, deficiente y mala).

ATRIBUTOS	DESCRIPCIÓN
Funcionalidad	El software tiene la capacidad de proporcionar funciones adecuadas; resultados correctos, precisos y satisface las necesidades del cliente; cuenta con mecanismos de seguridad y control de acceso no autorizados a los datos.
Confiabilidad	El software tiene la capacidad de evitar errores; esta preparado para mantener un desempeño adecuado en caso de fallas o errores; considera las acciones necesarias para recuperarse en caso de fallas de manera fácil y rápida.
Usabilidad	El software es fácil de entender en su conveniencia y en cómo puede ser utilizado; permite al usuario aprender su utilización de manera fácil y rápida; facilita su operación y control.
Eficiencia	El software cuenta con tiempos adecuados de respuesta al realizar sus funciones.
Portabilidad	El software puede adaptarse a diferentes entornos sin la necesidad de aplicar acciones específicas a la establecida.
Mantenibilidad	La facilidad con la que un sistema o componente software puede ser modificado para corregir fallos, mejorar su funcionamiento u otros atributos o adaptarse a cambios en el entorno.

**Figura 3.3.** Metodología ISO 9126 y 14958 apartado 5. La cual considera seis atributos destinados al usuario para evaluar la calidad de software.

El cuestionario se aplicó a 10 usuarios finales, los cuales fueron elegidos de acuerdo a dos criterios: el primero, que tuvieran conocimientos y uso de tabletas digitales, y el segundo, que conocieran el significado de los datos que se piden en la aplicación. En un estudio parecido consideraron a seis usuarios para realizar las pruebas: tres expertos en lingüística y tres no expertos en este ámbito, los cuales deberían tener conocimientos básicos del uso de Internet y no haber utilizado previamente la aplicación (Marcos *et al.*, 2006).

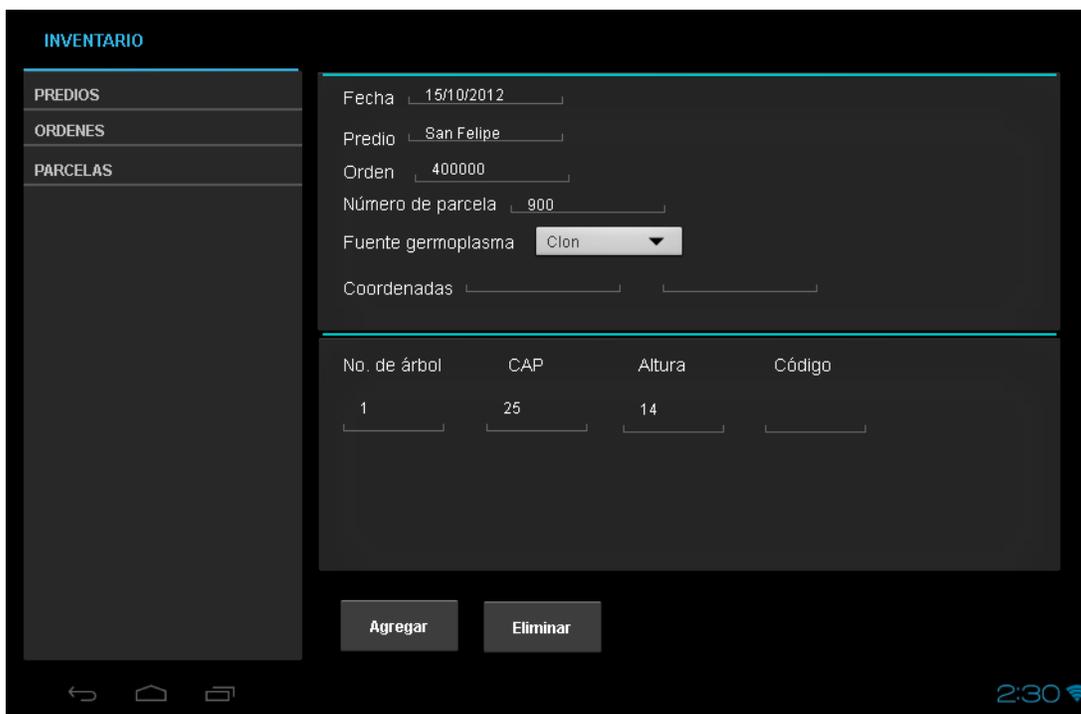
Los resultados obtenidos de los 10 cuestionarios, se analizaron mediante estadística descriptiva con base en los factores y escalas definidos; en la evaluación se utilizaron las medidas de tendencia central, media y mediana; Cobo y Batanero (2000) mencionan que una de las debilidades de la media es que puede estar influenciada por valores extremos, mientras que la mediana está comprendida entre el valor mínimo y máximo de los datos, lo cual sugiere que esta última puede ser más representativa de los mismos. Con esta referencia se decidió elegir ambas para medir la calidad. Los valores de las medias y las medianas se calificaron de acuerdo con las siguientes categorías de calidad, para valores entre 1.00 y 1.80 se calificaron como “Excelente”, valores entre 1.81 y 2.6 se calificaron como “Buena”, valores entre 2.61 y 3.40 se calificaron como “Aceptable”, valores entre 3.41 y 4.20 se calificaron como “Deficiente” y para valores superiores a 4.20 la calificación asignada se consideró como “Mala”.

### **3.5. RESULTADOS Y DISCUSIÓN**

La base de datos del sistema fue diseñada a través de la conversión del diagrama de clases al esquema del modelo relacional, esto se hizo debido a que el gestor SQLite seleccionado para realizar bases de datos se sustenta bajo el modelo relacional.

Las variables consideradas finalmente para la interfaz fueron: predio, orden, número de sitio, fecha, fuente de germoplasma, coordenadas de la parcela, fecha de plantación, responsable, número de árbol, circunferencia a la altura del pecho, altura, condición del árbol y observaciones. Las variables de diámetro normal, altura, condición del árbol y observaciones, son obtenidas directamente en campo; mientras las variables restantes como; predio, parcela orden número de sitio, etc., se acceden a ellas a través de la base de datos de la aplicación. Las variables fuente de germoplasma y condición del árbol

presentan un rango de valores predeterminados, la primera solo tiene dos valores: semilla o clon; la segunda, puede adquirir los siguientes valores: B (bifurcado), CQ (copa quebrada), P (plagado o enfermo), MP (muerto en pie), M (muerto o derribado), I (inclinado pero vivo). Las acciones que se pueden realizar en la interfaz son: seleccionar (predios, órdenes y parcelas), guardar y eliminar datos (Figura 3.4).



**Figura 3.4.** Interfaz del dispositivo móvil (tableta). Incluye las variables que se tienen que capturar para estimar el inventario y las acciones para almacenar la información en la base de datos.

La codificación de la aplicación genera los siguientes archivos: src (carpeta que contiene el código fuente de la aplicación), gen (carpeta que contiene el código generado automáticamente por el SDK (Software Development Kit - Kit de desarrollo de software, conjunto de herramientas y programas de desarrollo que permite al programador crear aplicaciones), Android xx (genera el código JAR de la API seleccionada), Android dependencies (librerías asociadas al proyecto), assets (carpeta que contiene ficheros usados por la aplicación), bin

(carpeta que compila el código generando un archivo con la extensión .apk), libs (código JAR con librerías que se pueden usar en el proyecto), res (carpeta que contiene los recursos usados por la aplicación), AndroidManifest.xml (fichero que indica las actividades, intenciones, servicios y proveedores de la aplicación), defaultproperties (fichero generado automáticamente por el SDK).

### 3.5.1. Calidad del software

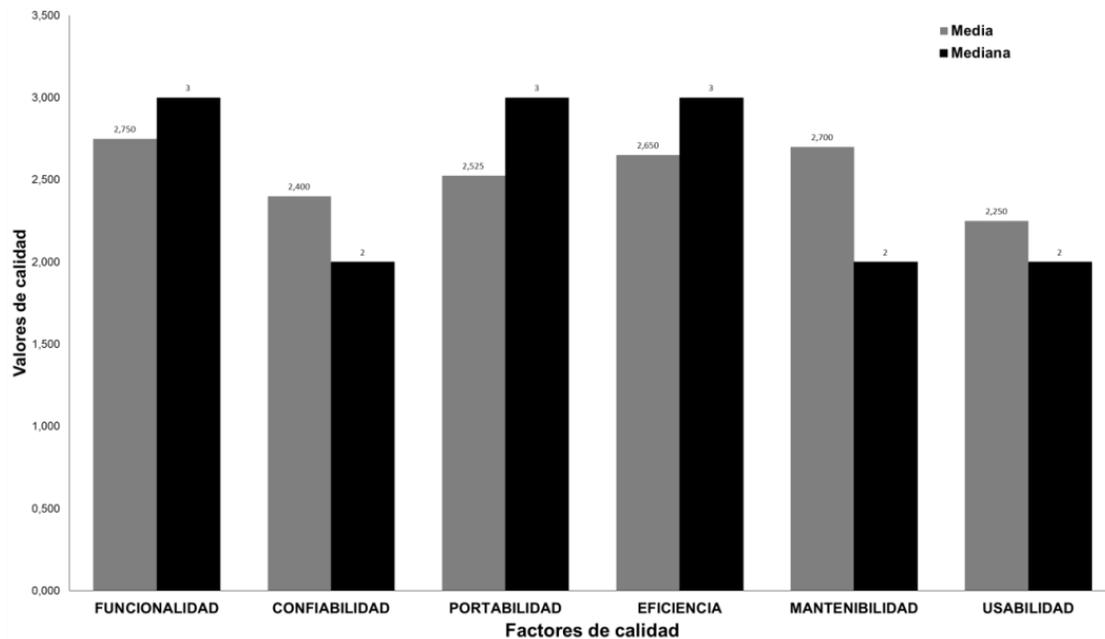
Los resultados de la prueba de la calidad demostraron que el valor máximo de la media correspondió al factor de funcionalidad, 2.750 y el valor mínimo 2.250, para el factor de usabilidad; mientras que para la mediana, el valor máximo 3 se presentó en los atributos, portabilidad, eficiencia y funcionalidad, en tanto que el valor mínimo de 2 en los atributos de confiabilidad y usabilidad; esto significa que el factor “con mejor calificación” es aquel que tiene el menor valor (Cuadro 3.1).

**Cuadro 3.1.** Estadísticos obtenidos de los once factores de calidad.

Factor de calidad	Media	Mediana	Varianza	Desviación estándar
Funcionabilidad	2.750	3	1.423	1.193
Confiabilidad	2.400	2	1.221	1.105
Portabilidad	2.525	3	1.281	1.132
Eficiencia	2.650	3	1.567	1.252
Mantenibilidad	2.700	2.5	1.274	1.129
Usabilidad	2.250	2	1.250	1.118
Promedio	2.546	2.583	1.335	1.154

De los seis factores de calidad aplicados, tanto para la media como la mediana 50 % presentó un nivel de calidad buena y 50 % cumplió con una calidad aceptable; en términos generales promediando los seis atributos de calidad, se

obtuvo para la media 2.546 y para la mediana 2.583, lo que indica que la aplicación móvil presenta una calidad buena (Figura 3.5).



**Figura 3.5.** Categorías de calidad por factor. Los valores colocados encima de las barras representan la media y la mediana de cada factor de calidad, se aprecia que tres de ellos se encuentran en un nivel de calidad buena y los restantes de calidad aceptable.

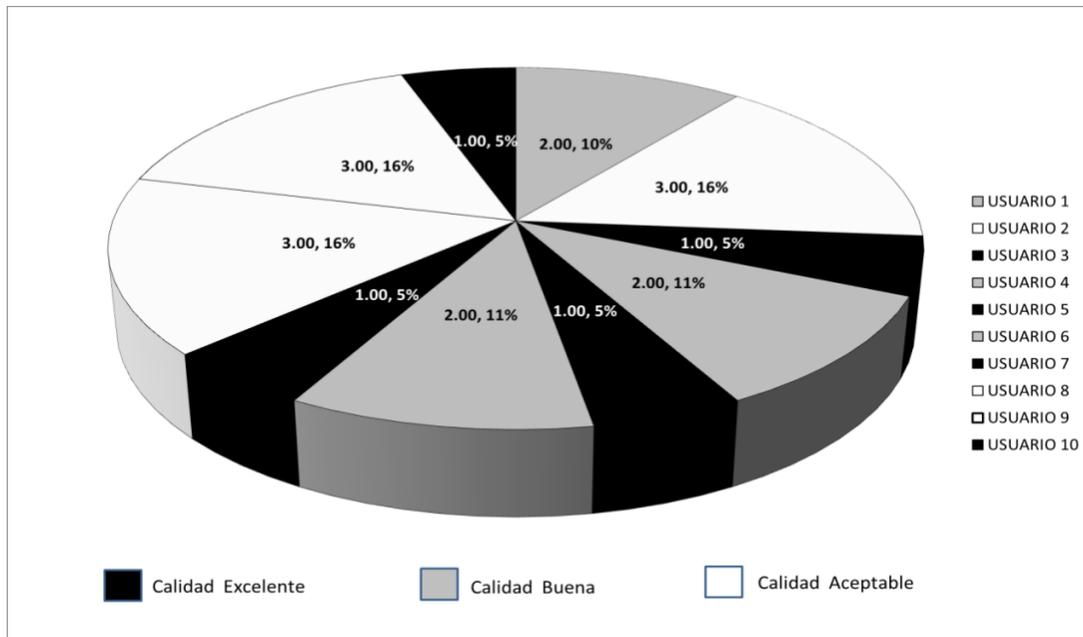
Macías y Gómez (2010) encontraron que al integrar al usuario en la evaluación, se incrementó la calidad del software significativamente, en 10 de los 11 factores propuestos. Identificaron que los factores de Conformidad, Exactitud, Seguridad, Comprensibilidad, Facilidad de Aprendizaje, Operabilidad y Tiempo de Respuesta tuvieron un nivel de calidad “Muy Buena”; mientras que los factores de Madurez, Tolerancia a Fallas, Recuperabilidad y Adaptabilidad tuvieron una calidad “aceptable”. En consecuencia, todos los elementos evaluados pasaron la prueba de calidad. Por otra parte, Benítez y Ramírez (2013), registraron un nivel de excelencia y alto cumplimiento para los factores eficiencia (media  $X = 1.025$  con desviación estándar de 0.085), portabilidad (media  $X = 1.035$  con desviación estándar de 0.085), funcionalidad ( $X = 1.075$  y una desviación estándar de 0.095), usabilidad (media  $X = 1.035$  con desviación

estándar de 0.095), fiabilidad (media  $X = 1.025$  con desviación estándar de 0.095) y la mantenibilidad de la herramienta (media  $X = 1.025$  con desviación estándar de 0.095). En términos generales de calidad, se obtuvo una media de 1.085 con una desviación estándar de 0.075. Para la evaluación de la interfaz por parte de los usuarios (Cuadro 3.2), cuatro de los usuarios consideraron que la aplicación es excelente, tres aceptable y tres buena con respecto a la media, en tanto a la mediana, uno la considero como excelente, tres como buena y seis como aceptable.

**Cuadro 3.2.** Opinión de los usuarios finales sobre la calidad del software.

Usuarios finales	Media	Categoría de calidad	Mediana	Categoría de calidad	Varianza	Desviación estándar
Usuario 1	2	Buena	3	Aceptable	1.418	1.191
Usuario 2	3	Aceptable	3	Aceptable	1.608	1.268
Usuario 3	1	Excelente	3	Aceptable	1.484	1.218
Usuario 4	2	Buena	3	Aceptable	1.608	1.268
Usuario 5	1	Excelente	3	Aceptable	1.082	1.040
Usuario 6	2	Buena	1.5	Excelente	1.253	1.119
Usuario 7	1	Excelente	2	Buena	0.871	0.933
Usuario 8	3	Aceptable	3	Aceptable	1.250	1.118
Usuario 9	3	Aceptable	2	Buena	1.313	1.146
Usuario10	1	Excelente	2.5	Buena	1.418	1.191
Promedio	1.9	Buena	2.6	Buena	1.330	1.149

En este sentido, la evaluación hecha por los usuarios finales a la interfaz determinó que 70 % se encuentra entre una calidad buena a excelente y el 30 % menciona que tiene una calidad aceptable. El promedio obtenido de la media por los diez usuarios fue de 1.9, mientras que el promedio de la mediana fue de 2.6; ambos promedios se encuentran en el rango de calidad de 1.81 y 2.6, lo que significa que la calidad de la aplicación es buena (Figura 3.6).



**Figura 3.6.** Categorías de calidad por usuario. Los valores por encima de cada sector circular representan el promedio de los seis factores de calidad, se puede apreciar que siete usuarios consideraron que la aplicación tiene una calidad de buena a excelente, mientras que tres mencionaron que tiene una calidad aceptable de acuerdo a la medida central “media”.

El desarrollo de aplicaciones para proveer servicios móviles, difiere del desarrollo de software tradicional en muchos aspectos, lo que provoca que las metodologías usadas para estos entornos móviles, también difieren del software clásico (Gasca *et al.*, 2014). La creación de las aplicaciones requieren la constante vinculación con los modelos de calidad que permitan evidenciar los niveles de excelencia de los productos e instrumentos de medición incluyendo variables, indicadores y factores que califiquen cada uno de los atributos que lo conforman (Benítez y Ramírez, 2013). Greiner *et al.* (2014) precisan que la gestión cuantitativa de procesos, proporciona una visión del grado de cumplimiento de metas así como un conocimiento cuantitativo, es decir medible y determinable, cuyo rendimiento afecta en forma significativa el logro de los objetivos del proyecto y la satisfacción de los clientes.

### **3.6. CONCLUSIONES**

El uso de la aplicación móvil en una tableta descarta el posible daño en los formatos y la pérdida de estos en campo; además evita la duplicación de trabajo y el error de ilegibilidad de datos. Por otra parte, la legibilidad de los datos se vuelve clara al contar con una interfaz que tiene establecido un tipo y tamaño de letra de forma automática, fácil de visualizar por el usuario. La duplicación del trabajo se reduce significativamente al, no capturar nuevamente la información de los formatos al medio electrónico.

La evaluación de los atributos de calidad estableció que la aplicación tiene un nivel bueno y satisface las necesidades esenciales requeridas. Finalmente, las medidas de tendencia central utilizadas en la evaluación, media y mediana presentaron un comportamiento semejante, ambas estuvieron dentro del rango establecido para el nivel de calidad buena.

## **CAPÍTULO IV. ESTIMACIÓN DE VOLUMEN POR SITIO USANDO REMEDICIONES Y ESTIMADOR DE RAZÓN EN PLANTACIONES DE EUCALIPTO**

### **4.1 RESUMEN**

La información provista por un inventario y un método hecho para proyectar el volumen permiten estimar de manera precisa la producción de una plantación. Partiendo de este supuesto el presente trabajo se enfocó en obtener un estimador de razón (índice de volumen por sitio) usando remediciones. Además se compararon los volúmenes por sitio estimado por el sistema de crecimiento-rendimiento maderable (SCRM) y por el estimador de razón contra los volúmenes obtenidos en la remedición. Para obtener el estimador de razón de volumen por sitio se usó un tamaño de muestra de 36 parcelas remediadas, con los volúmenes obtenidos de estas y los medidos en 2012, se generó el índice. En la comparación de volúmenes entre el SCRM y el estimador de razón contra la remedición, se eligió una nueva muestra de sitios con la cual se estimaron los volúmenes para ambos métodos. El estimador de razón ( $\hat{R}$ ) obtenido fue de  $1.16 \text{ m}^3 \text{ sitio}^{-1}\text{año}^{-1}$  ( $23.2 \text{ m}^3 \text{ ha}^{-1} \text{ año}^{-1}$ ). En tanto que la media de la razón ( $\bar{y}_R$ ), la varianza de la razón ( $S_{Ru}^2$ ) y la varianza de la media ( $S_{\bar{y}_R}^2$ ) fueron de 7.072, 0.0001 y 0.005 respectivamente. Los resultados de la comparación de volúmenes entre el SCRM y la remedición demostraron que el incremento de volumen de la remedición fue de  $1.22 \text{ m}^3 \text{ sitio}^{-1}\text{año}^{-1}$  ( $24.4 \text{ m}^3 \text{ ha}^{-1} \text{ año}^{-1}$ ) mientras que el SCRM registro  $0.93 \text{ m}^3 \text{ sitio}^{-1}\text{año}^{-1}$  ( $18.6 \text{ m}^3 \text{ ha}^{-1} \text{ año}^{-1}$ ). La comparación entre el volumen proyectado entre el SCRM y el estimador de razón, reflejó que el primero sobrestima el volumen en 66% de los sitios, mientras que el otro lo subestima en 68% de los sitios. Los errores de estimación fueron de aproximadamente 4.2%. En conclusión, se obtuvo un índice de volumen que podrá ser utilizado para proyectar el volumen futuro por sitio de la plantación.

**Palabras clave:** inventario forestal, plantación forestal, proyección de volumen, remediación de sitios, sistema de crecimiento y rendimiento maderable.

## **ESTIMATION OF VOLUME PER SITE USING REMEASUREMENTS AND RATIO ESTIMATOR IN PLANTATIONS OF EUCALYPTUS**

### **4.2. ABSTRACT**

The information provided by an inventory and a volume projection method make it possible to estimate accurately the production of a plantation. Under this assumption the present work focused on obtaining a ratio estimator (index volume per site) using remeasurements. Besides the volumes estimated by the growth system-performance timber (SCRM) and the ratio estimator were compared against the volumes obtained in the remeasurement. In order to get the volume ratio estimator per site, a sample size of 36 plots was re-measured, while the index was generated with the volumes obtained and the values measured in 2012. In the comparison of volumes between the SCRM and the ratio estimator against the remeasurement, a new site sample was selected to estimate volume with both methods. The ratio estimator ( $\hat{R}$ ) obtained was 1.16  $\text{m}^3 \text{ site}^{-1} \text{ year}^{-1}$  ( $23.2 \text{ m}^3 \text{ ha}^{-1} \text{ year}^{-1}$ ). While the average rate ( $\bar{y}_R$ ), the variance of the ratio ( $S_{Ru}^2$ ) and the variance of the mean ( $S_{\bar{y}_R}^2$ ) were 7.072, 0.0001 and 0.005 respectively. The results of the comparison of volumes between the SCRM and the remeasurement showed that the increase in volume of the remeasurement was  $1.22 \text{ m}^3 \text{ site}^{-1} \text{ year}^{-1}$  ( $24.4 \text{ m}^3 \text{ ha}^{-1} \text{ year}^{-1}$ ) while the SCRM estimated  $0.93 \text{ m}^3 \text{ site}^{-1} \text{ year}^{-1}$  ( $18.6 \text{ m}^3 \text{ ha}^{-1} \text{ year}^{-1}$ ). The comparison between the projected volume between the SCRM and the ratio estimator reflected that the former overestimates the volume by 66%, while the other underestimates it in 68% of the sites. Estimation errors were approximately 4.2%. In conclusion, a volume index was obtained by site that can be used to project the future size of the plantation.

**Key words:** forest inventory, forest plantation, volume projection, remeasurement of sites, system of growth and wood performance.

### 4.3. INTRODUCCIÓN

Inventariar los recursos representa una tarea trascendente para conocer la producción de las plantaciones en el presente pero también para realizar proyecciones futuras, ya que aún sigue siendo uno de los problemas más frecuentes la estimación de volúmenes de los árboles en pie. El volumen total o comercial de un árbol puede ser estimado a través de varios métodos analíticos. Para la estimación del volumen total se emplean las funciones de volumen que permiten estimar el volumen sólo hasta un determinado índice de utilización; las funciones de razón estiman el volumen comercial hasta un determinado porcentaje del volumen total del árbol, mientras que, las funciones de ahusamiento son expresiones matemáticas que tienen la capacidad de describir el perfil fustal de un árbol (Trincado *et al.*, 1997). De acuerdo a González *et al.* (2013) los modelos de crecimiento son herramientas muy útiles para predecir el desarrollo de una masa forestal. Cabe mencionar que los modelos pueden ajustarse con variables como el área basal, la altura dominante, el volumen o la biomasa y se pueden determinar de manera sencilla a partir de los diámetros normales y las alturas totales recogidas en inventarios dasométricos habituales.

Otra forma de estimar el volumen de una plantación es prediciendo el incremento y la productividad, por lo general, se recurre al uso de modelos matemáticos. Los modelos expresan la realidad biológica a través de ecuaciones conocidas como sistema de crecimiento y rendimiento maderable (Santiago *et al.*, 2013); las cuales se utilizan para proyectar componentes como la altura dominante, el área basal, la supervivencia residual (mortalidad) y el volumen total, en función de la edad y sus interrelaciones con el rodal (Galán *et al.*, 2008). El patrón de crecimiento en altura dominante de una masa

forestal se usa tradicionalmente como indicador de la productividad total del sitio forestal. Así, los componentes de un SCRM, generalmente representados por el área basal, mortalidad y volumen maderable, están correlacionados con la altura dominante y sus proyecciones son afectadas por su patrón de crecimiento (Gómez *et al.*, 2009).

Los objetivos considerados en este estudio fueron: obtener un estimador de razón (índice de volumen por sitio) utilizando la remediación de parcelas para proyectar el volumen futuro de una plantación; comparar el volumen por sitio estimado por el Sistema de Crecimiento y Rendimiento Maderable (SCRM) a través del software EICRM (Estimador del Inventario y Crecimiento-Rendimiento Maderable) contra los valores obtenidos en la remediación de sitios y, finalmente, comparar los volúmenes por sitio estimados por el estimador de razón contra los volúmenes de los sitios remediados.

#### **4.4. MATERIALES Y MÉTODOS**

##### **4.4.1. Datos dasométricos**

Se utilizaron 77 sitios temporales de dimensiones fijas de 500 m<sup>2</sup> (20 m de ancho x 25 m de largo) elegidos aleatoriamente; de los cuales, 36 sitios fueron para calcular el estimador de razón y 41 para realizar la comparación entre métodos. Los sitios fueron medidos en primera instancia en el inventario efectuado en enero del 2012 y remediados en febrero del 2013, es decir, un año y un mes entre mediciones. En cada sitio se registró el número de árboles, edad, diámetro normal, altura total, especie y fuente (semilla o vegetativamente “clones”).

#### 4.4.2. Modelos de cubicación

El volumen de los árboles en pie se estimó con dos funciones de volumen total con corteza, específicos para la zona (Roldan *et al.*, 2013); uno para individuos provenientes de semilla y el otro para individuos clonados, ambas funciones toman en cuenta el diámetro normal, la edad y la altura del fuste (Cuadro 4.1).

**Cuadro 4.1.** Modelos para la cubicación de volumen total del arbolado en pie.

Variable	Ecuación
Volumen total con corteza para árboles provenientes de semilla	$VT_s = 0.000067 D^{1.694084} H^{1.032558} E^{0.038023}$
Volumen total con corteza para árboles clonados	$VT_c = 0.0000618 D^{1.694084} H^{1.032558} E^{0.127879}$

D=diámetro normal en m; H=altura total en m; E=edad en años.

#### 4.4.3. Sistema de ecuaciones del modelo de crecimiento y rendimiento.

El conjunto de ecuaciones utilizadas pertenecen a un modelo explícito hecho especialmente para el área de estudio (Roldan *et al.*, 2013); el modelo se encarga de proyectar componentes de altura dominante, área basal, supervivencia residual (mortalidad) y volumen total de la plantación en función de la edad y de sus interrelaciones como componentes del rodal (Cuadro 4.2).

**Cuadro 4.2.** Ecuaciones del modelo de crecimiento y rendimiento maderable.

Variable	Ecuación
Altura dominante	$A = \frac{34.8558}{1 + e^{1.3048 \times E^{-1.2163}}}$

Área basal

$$AB = e^{-4.9133} \times e^{\left(-\frac{0.7748}{E}\right)} \times A^{1.1893} \times N^{0.6218}$$

Número de árboles  
sobrevivientes

$$N_2 = N_1 \times e^{-0.0299 \times (E_2 - E_1)}$$

Volumen total

$$V = 0.8294 \times AB^{0.9923} \times A^{0.7357}$$

---

A= altura dominante en m; AB= área basal en m<sup>2</sup>ha<sup>-1</sup>; N<sub>2</sub> = número de árboles sobrevivientes por ha a la E<sub>2</sub> a partir de la edad de referencia E<sub>1</sub>; V= volumen total m<sup>3</sup>ha<sup>-1</sup>; E = edad en años; E<sub>1</sub> = edad inicial; E<sub>2</sub> = edad final.

#### 4.4.4. Cálculo del estimador de razón utilizando remediación de parcelas

Para el cálculo del tamaño de muestra se tomó como población a 976 sitios medidos en el inventario 2012, de ellos se eligió aleatoriamente un tamaño de muestra preliminar de 30 sitios los cuales sirvieron para pronosticar el tamaño de muestra definitivo, que debe ser mayor al preliminar, Velasco *et al.* (2003) explican que el estimador de razón suele ser sesgado, sin embargo, para un tamaño de muestra grande (mayor a 30) y un coeficiente de variación de la media muestral de la variable auxiliar menor o igual a 0.10, el sesgo es despreciable para el análisis de resultados. Además del tamaño de muestra, se consideraron otros dos estimadores del muestreo aleatorio simple (media muestral y varianza muestral) (Cuadro 4.3).

**Cuadro 4.3.** Estimadores para el Muestreo Aleatorio Simple.

Estimador	Ecuación
Media muestral	$\bar{y} = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n y_i$
Varianza muestral	$S_y^2 = \frac{\sum_{i=1}^n (y_i - \bar{y})^2}{n - 1}$
Tamaño de muestra	$n = \frac{t_{n-1, (\alpha/2)}^2 N S_y^2}{B^2 N + S_y^2 t_{n-1, (\alpha/2)}^2}$

$y_i$  =volumen con corteza en  $m^3$  en el  $i$ -ésimo sitio de muestreo;  $N$ =número total de unidades de muestreo en la población;  $n$ =número de unidades incluidas en la muestra;  $B$ =tamaño aceptable del error de estimación o de muestreo;  $t$ =distribución  $t$  de Student.

La precisión se estableció con un error absoluto máximo de 0.73 y una confiabilidad del 95%. Con el tamaño de muestra definitivo se procedió a seleccionar los sitios de forma aleatoria, los cuales fueron remedidos en el inventario del año siguiente. Para calcular el estimador de razón se procedió de la siguiente forma: de la base de datos del inventario 2012 se identificaron los sitios seleccionados; los mismos sitios se remidieron en el inventario 2013. De los datos de las remediciones se eligieron los valores de diámetro, altura y edad para calcular el volumen por árbol usando los modelos de cubicación en pie para individuos provenientes de semilla y para individuos clonados (Roldan *et al.*, 2013), para que finalmente se obtuvieran los volúmenes por sitios. Considerando los volúmenes de los sitios de ambos inventarios se calculó el estimador de razón, la media, la varianza de la razón y la varianza de la media (Cuadro 4.4).

**Cuadro 4.4.** Estimadores para el muestreo de Razón (Proporción).

Estimador	Ecuación
Estimador de Razón	$\hat{R} = \frac{\bar{y}}{\bar{x}} = \frac{\sum_{i=1}^n y_i}{\sum_{i=1}^n x_i}$
Media	$\bar{y}_R = \hat{R}\mu_x = \frac{\bar{y}}{\bar{x}}\mu_x$
	$S_{\hat{R}}^2 = \frac{1}{\mu_x^2} \frac{S_u^2}{n} \left(1 - \frac{n}{N}\right)$
Varianza de la Razón	$S_u^2 = \frac{\sum_{i=1}^n (y_i - \hat{R}x_i)^2}{n - 1}$
	$= \frac{\sum_{i=1}^n y_i^2 + \hat{R}^2 \sum_{i=1}^n x_i^2 - 2\hat{R} \sum_{i=1}^n x_i y_i}{n - 1}$
Varianza de la Media	$S_{\bar{y}_R}^2 = \frac{S_u^2}{n} \left(1 - \frac{n}{N}\right)$

#### **4.4.5. Selección del tamaño de muestra preliminar para la comprobación de volumen entre EICRM contra remediación y la comparación de volumen entre SCRM y el estimador de razón**

Fue necesario considerar nuevos sitios para evitar la influencia en los resultados con los sitios ya utilizados. Se seleccionaron al azar 30 sitios como tamaño de muestra preliminar los cuales se utilizaron para estimar el tamaño de muestra definitivo. La precisión se estableció con un error absoluto máximo de 0.4 y una confiabilidad del 95%. Además se tomaron en cuenta los estimadores (media muestral y varianza muestral).

#### **4.4.6. Comparación del volumen proyectado entre el software EICRM contra los sitios de remediación**

A través del software EICRM utilizado para estimar el inventario y el crecimiento-rendimiento maderable de la plantación, se estimó el volumen total por sitio para el año 2012 y su proyección del mismo para un año y un mes (1.08), que es el tiempo que corresponde a la medición del 2013. El cálculo se realizó mediante la integración de las ecuaciones de cubicación, el modelo de crecimiento-rendimiento maderable y la base de datos. Se tomaron como parámetros de evaluación el volumen promedio por sitio, los volúmenes totales y los porcentajes de ambos.

#### **4.4.7. Comparación del volumen proyectado entre el estimador de razón contra los sitios de remediación**

La comparación de volúmenes entre el SCRM y el estimador de razón se realizó a través de los cálculos de volúmenes de los sitios de ambos métodos contra los valores de la remediación del inventario del 2013. El proceso comparativo se efectuó mediante el uso de regresión lineal simple, análisis de residuales y medidas de dispersión. Frecuentemente los métodos de regresión son utilizados para analizar datos que provienen de estudios que no fueron diseñados pero que también son muy útiles en experimentos diseñados (Morales y González, 2003). Por lo general, el uso de la regresión se utiliza para construir un modelo cuantitativo que relaciona los factores importantes con la respuesta.

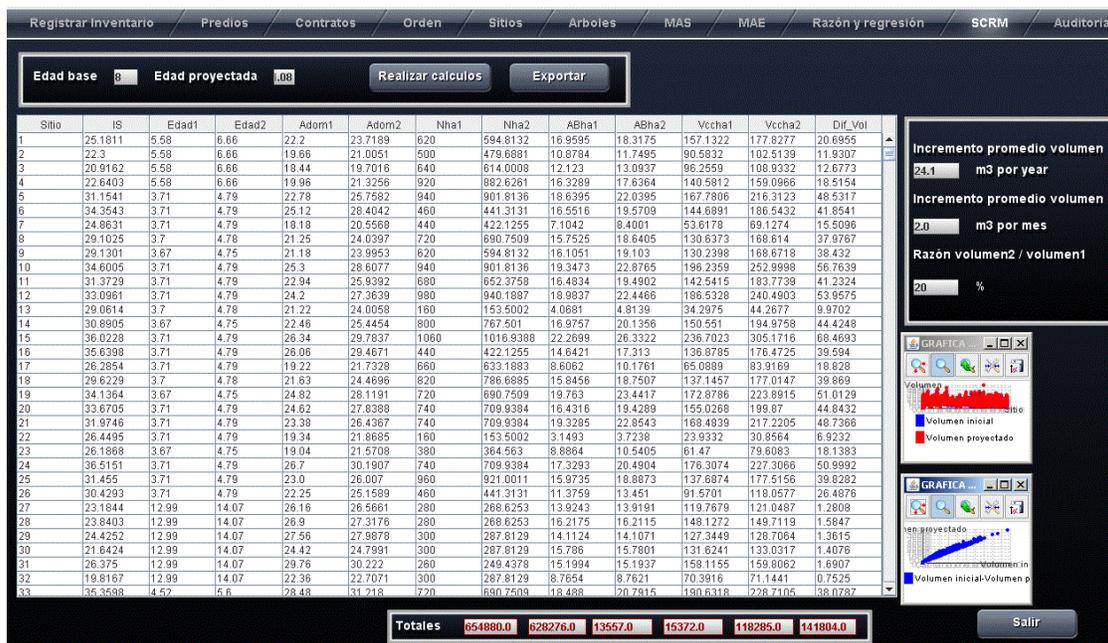
#### **4.5. RESULTADOS Y DISCUSIÓN**

De acuerdo al tamaño de muestra preliminar de 30 sitios, una media de 7.33, una varianza de 6.02 y una precisión con un error absoluto máximo de 0.73 y una confiabilidad del 95%, el tamaño de muestra final fue de  $35.62 \approx 36$  sitios de remediación que corresponden a 3.7 % de la población. El uso de un tamaño de muestra preliminar favorece a determinar un tamaño de muestra definitivo, lo que garantiza un nivel de confianza y precisión deseada siendo altamente dependientes del valor de la varianza (Alonso y Ospina, 2001).

El cálculo del estimador de razón a través de la remediación de parcelas llevó a los siguientes valores: el número total de árboles registrados en los 36 sitios en el inventario 2012 fue de 1338, mientras que para los mismos sitios en el 2013 fue de 1273, es decir, 65 árboles ya no fueron medidos, lo que probablemente se debió a derribos o a que los arboles estaban muertos. De los 36 sitios remediados, 30 pertenecen a fuente “clon” mientras que seis a fuente “semilla”. Por otra parte el volumen registrado en 2012 de los 36 sitios fue de  $5704.2 \text{ m}^3 \text{ ha}^{-1} \text{ año}^{-1}$ , mientras que para el 2013 fue de  $6657.2 \text{ m}^3 \text{ ha}^{-1} \text{ año}^{-1}$ . Por lo tanto el estimador de razón ( $\hat{R}$ ) obtenido correspondiente al volumen medio estimado a partir del volumen del año anterior con un mes, fue de  $23.2 \text{ m}^3 \text{ ha}^{-1} \text{ año}^{-1}$ . En tanto que la media de la razón ( $\bar{y}_R$ ), la varianza de la razón ( $S_{Ru}^2$ ) y la varianza de

la media ( $S_{\bar{y}_R}^2$ ) fueron de 7.072, 0.00014 y 0.00515 respectivamente. Roldan *et al.* (2013) usando el estimador de razón volumen a la edad<sup>-1</sup> encontró que el incremento anual en las plantaciones es de 0.98 casi de 1, es decir, 19.6 m<sup>3</sup> ha<sup>-1</sup> año<sup>-1</sup>. La diferencia de valores posiblemente se debe a que la variable auxiliar en ambos casos no es la misma, ya que para uno la variable utilizada fue la edad mientras que para el otro fue el volumen remedido, además, la edad fue 0.08 años (un mes) menor que el otro.

La comparación del volumen proyectado por el software EICRM (Figura 4.1), y la remediación fue con un tamaño de muestra final de 41 sitios de remediación correspondiente al 4.2 % de la población con media 8.99, varianza 8.98, una precisión con un error absoluto máximo de 0.4 y una confiabilidad del 95%. Usando este tamaño de muestra se encontró que, el 37% de los sitios calculados por SCRM sobreestimó el volumen mientras que 63% lo subestimó. El incremento de volumen de la remediación fue de 24.4 m<sup>3</sup> ha<sup>-1</sup> año<sup>-1</sup> mientras que el SCRM registró 18.6 m<sup>3</sup> ha<sup>-1</sup> año<sup>-1</sup>. El volumen total de los 41 sitios fue de 8017 m<sup>3</sup> ha<sup>-1</sup> año<sup>-1</sup> para el SCRM y de 8255.6 m<sup>3</sup> ha<sup>-1</sup> año<sup>-1</sup> para la remediación. De acuerdo con estos totales la remediación que se considera como la medición real, fue mayor, por lo tanto el SCRM subestima el volumen en 238.6 m<sup>3</sup> ha<sup>-1</sup> año<sup>-1</sup>.



**Figura 4.1.** Pantalla que proyecta en el tiempo las variables del SCR en el software EICRM.

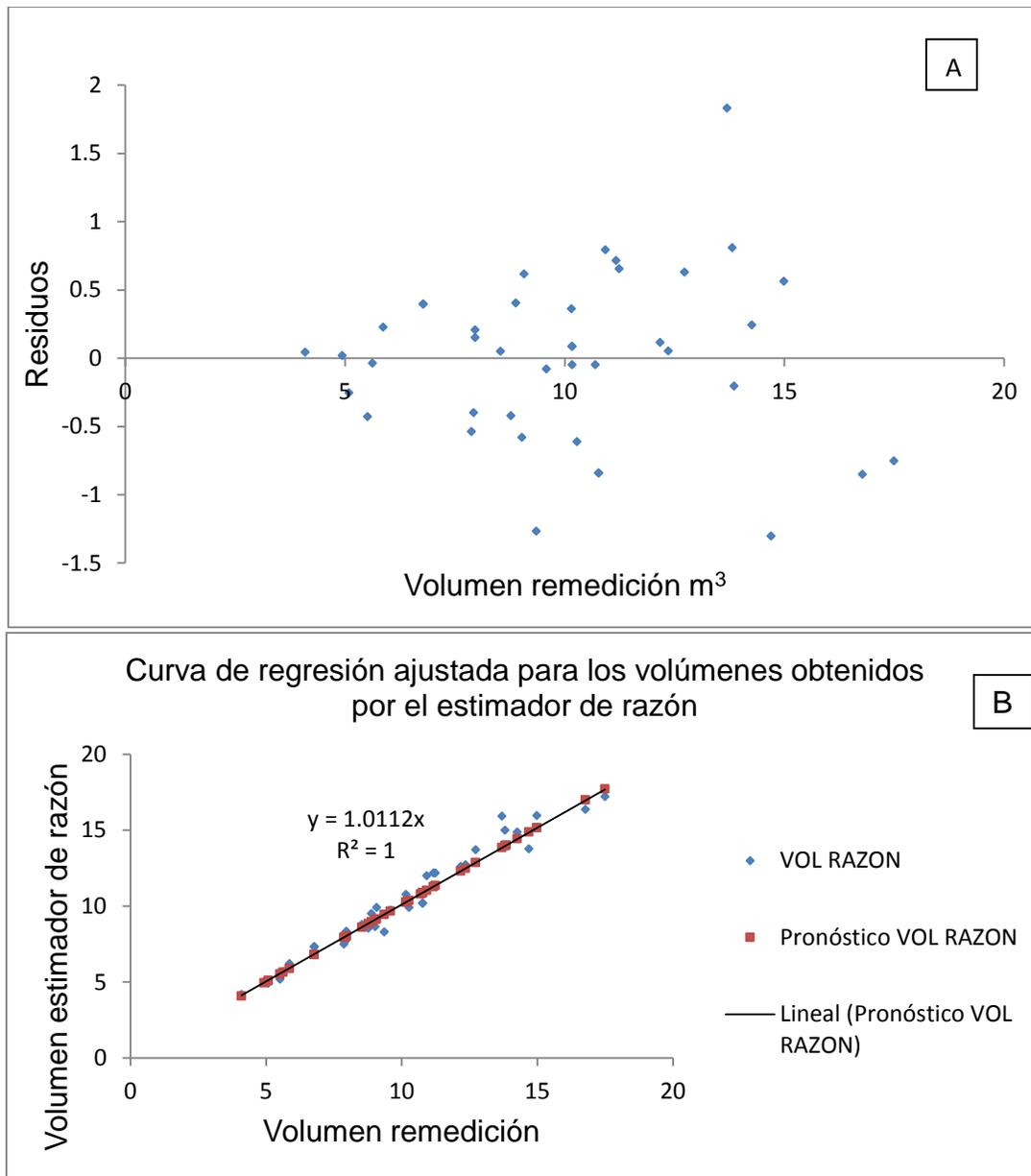
Finalmente, con el mismo tamaño de muestra de 41 sitios se compararon los volúmenes por sitio entre los métodos del estimador de razón y los sitios de remediación. Se demostró que, el 68% de los sitios calculados por el estimador de razón sobreestima el volumen mientras que 32% lo subestima. El incremento de volumen de la remediación fue de 24.4 m<sup>3</sup> ha<sup>-1</sup> año<sup>-1</sup> mientras que el estimador de razón registro 29.4 m<sup>3</sup> ha<sup>-1</sup> año<sup>-1</sup>. El volumen total de los 41 sitios fue de 8465.6 m<sup>3</sup> ha<sup>-1</sup> año<sup>-1</sup> para el estimador de razón y de 8255.6 m<sup>3</sup> ha<sup>-1</sup> año<sup>-1</sup> para la remediación. De acuerdo con estos totales la remediación que se considera como la medición real, fue menor, por lo tanto el estimador de razón sobreestima el volumen en 210 m<sup>3</sup> ha<sup>-1</sup> año<sup>-1</sup>.

A través de las estadísticas de regresión (Cuadro 4.5), un primer criterio revela que los coeficientes de determinación no se diferenciaron significativamente entre los modelos del SCR y el estimador de razón.

**Cuadro 4.5.** Estadísticas de regresión para los métodos de proyección de volumen.

Método de proyección	Coefficiente de correlación	Coefficiente de determinación R <sup>2</sup>	R <sup>2</sup> ajustado	Error típico
SCRM	0.9829	0.9662	0.9654	0.6234
Estimador de razón	0.9851	0.9705	0.9698	0.5430

Se observa que el método del estimador de razón es un poco mejor (Figura 4.2.B); mientras que los residuales del volumen total con corteza estimados por el modelo del estimador de razón (Figura 4.2 A), manifiesta la no existencia de tendencia por los puntos de la variable dependiente. De hecho, un cierto equilibrio de los puntos en la parte de abajo y de arriba de la recta de referencia y una buena distribución del error a lo largo del eje de la variable estimada.



**Figura 4.2.** Análisis de residuales de la regresión (A) y curva de regresión ajustada para el volumen obtenido a través del estimador de razón (B).

Da Cunha y Guimaraes (2009) obtuvieron valores similares para varios modelos de volumen total, donde los coeficientes de determinación eran muy similares y su gráfico de residuales tenía una distribución homogénea.

#### **4.6. CONCLUSIONES**

Se obtuvo un estimador de razón (índice de volumen por sitio) que podrá proyectar el volumen futuro de la plantación bajo estudio. También se demostró que existe una subestimación del volumen proyectado por el Sistema de crecimiento y rendimiento maderable SCRM con respecto a la remediación y que el estimador de razón lo sobrestima. Tomando en cuenta estos resultados se puede establecer que si se desea ser conservador en la proyección del volumen se debe de elegir el método del SCRM, sin embargo, sabiendo que este método subestima y el del estimador de razón lo sobreestima, lo ideal sería considerar de forma integral ambos métodos, ya que la proyección del volumen se encuentra entre ambos valores.

## **CAPÍTULO V. ESTIMACIÓN DE LA ALTURA TOTAL EN PLANTACIONES DE EUCALIPTO APLICANDO REDES NEURONALES**

### **5.1. RESUMEN**

Se aplicará la técnica de redes neuronales artificiales para estimar la altura del arbolado en una plantación de eucalipto ubicada entre los estados de Veracruz y Tabasco. El propósito del estudio será disminuir los costos y agilizar el proceso en la toma de datos en campo del inventario sin tener que medir la altura. Para lo cual se utilizará información teórica de inventarios pasados y un modelo de redes neuronales estructurado con cuatro neuronas en la capa de entrada, dos en la capa oculta y una en la capa de salida. Además, se diseñará un modelo matemático agrupando la sumatoria de cada una de las variables principales y las interacciones de primer y segundo orden, más la media poblacional y el error experimental de la variable de respuesta. Para el entrenamiento de la red se utilizarán alrededor de 100,000 registros de datos (diámetro, altura, edad, fuente) de árboles de eucalipto medidos en los inventarios de 2008 y 2012 los cuales serán normalizados para evitar problemas numéricos. Con este proceso se pretende encontrar un modelo de red neuronal que al ser entrenada sea capaz de predecir la altura del arbolado en un 95% en un intervalo de confianza mínimo del 90%. Posteriormente, se pretende implementarlo en una aplicación instalada en una tableta digital que será utilizada para capturar los datos del inventario en campo. Cabe señalar que dicha aplicación fue construida como parte de este proyecto.

**Palabras claves:** red neuronal artificial, predicción de altura, plantación forestal, inventario forestal.

# **ESTIMATION OF TOTAL HEIGHT IN PLANTATIONS OF EUCALYPTUS APPLYING NETWORKS NEURONALES**

## **5.2. ABSTRACT**

The technique of artificial neural networks will be applied to estimate the tree height in a eucalyptus plantation located between the states of Veracruz and Tabasco. The purpose of the study will be to reduce costs and streamline the process in making the inventory data in the field without having to measure the height. To do this, theoretical information from past inventories and a structured neural network model with four neurons in the input layer, two in the hidden layer and the output layer will be used. Besides a mathematical model will be designed grouping the sum of each of the main variables and interactions of first and second order, plus the average population and the experimental error of the response variable. For training the network, around 100,000 data records (diameter, height, age, source) of eucalyptus trees inventories measured in 2008 and 2012 will be used, the data will be standardized to avoid numerical problems. This process aims to find a neural network model that is trained to predict the height of the trees by 95% over a range of at least 90% confidence. Subsequently, it is intended to implement it in the software installed in a digital tablet that will be used to capture the data field inventory. Note that this software was also built as a part of this project.

**Key words:** artificial neural network, prediction of height, forest plantation, forest inventory.

### 5.3. INTRODUCCIÓN

La estimación de la altura de los árboles es una de las mediciones principales requeridas para la toma de decisiones sobre el manejo de una plantación y para los trabajos de investigación sobre crecimiento y rendimiento. Por otro lado, en los inventarios forestales la altura total es necesaria para realizar estimaciones de volúmenes comerciales y a nivel de productos (Trincado y Leal, 2006). Por tanto, la altura del árbol se considera como una de las variables más útiles pero más difícil y costosa de medir en campo (Diéguez *et al.*, 2005); que junto con la densidad, y el diámetro a la altura del pecho (DAP), son requeridas para la estimación de volúmenes de madera y la productividad de masas forestales (Diamantopoulou y Özçelik, 2012). En el mejor de los casos el proceso de medición indirecta de la altura implica al menos tres etapas, cada una de las cuales consume un tiempo considerable al realizarse: 1) medición de la pendiente entre el árbol y el punto desde el cual se medirá la altura del árbol, en el caso que no se encuentre en terreno plano 2) medición de la distancia horizontal entre el árbol y el punto desde el cual se medirá la altura del árbol y 3) toma de la lectura con el instrumento en cuestión (López, 2005). Sin embargo, cuando uno se encuentra en campo en muchas ocasiones este procedimiento no es tan sencillo, ya que se tiene que batallar con terrenos no deshierbados o pendientes muy pronunciadas, que dificultan la medición. Otros aspectos que se tienen que considerar, son a los árboles adultos y los doseles relativamente cerrados ya que la medición de la altura se dificulta debido a la falta de visibilidad de la punta del árbol y la ocurrencia de los vientos (Marques da Silva *et al.*, 2013).

Algunos trabajos que han sido desarrollados exhiben la importancia que tiene la variable altura, por ejemplo Arias (2004) explica que, en un rodal coetáneo de una especie creciendo bajo condiciones de sitio similares, como las plantaciones, existe una relación no lineal entre la altura de los árboles y su correspondiente valor del diámetro a la altura del pecho. Un modelo de este

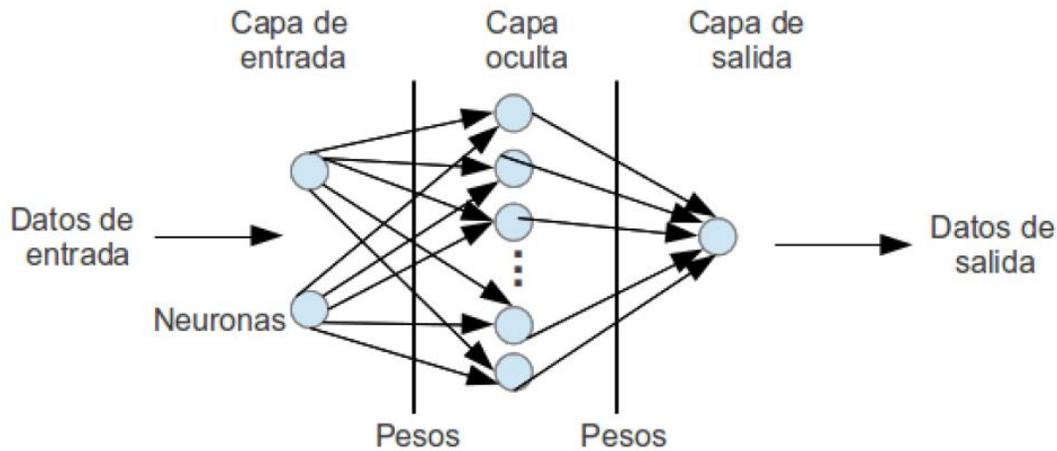
tipo es un componente importante para la estimación de la productividad del rodal y la caracterización del crecimiento cuando existe alguna dificultad en la medición de todos los árboles dentro de las parcelas de muestreo. En esta misma secuencia de ideas Barrio *et al.* (2004) señalan que la medición de la altura se realiza habitualmente sobre una submuestra del arbolado, por lo que es necesario obtener relaciones entre la altura y el diámetro para poder estimar el inventario. Por tanto, las redes artificiales neuronales (RAN) representan una alternativa prometedora en relación con las técnicas de regresión utilizadas (Marques da Silva *et al.*, 2013). Algunos trabajos han sido desarrollados a través de adaptaciones y parametrización de algunas situaciones especiales aplicando esta técnica, como en el cálculo aproximado del volumen de árboles y las estimaciones de altura del arbolado eliminando la medición de la altura en el campo. Incluso, se generó un modelo basado en una red neuronal que predice la altura de los árboles en plantaciones de especies forestales tropicales, el cual logra tener una mejor aproximación al comportamiento actual de estas, permitiendo ayudar a la toma de decisiones y a la planificación del mercado de la madera tropical (López *et al.*, 2012).

Considerando las evidencias de estos estudios se puede decir que la medición de la altura puede ser eficiente, si se utiliza el proceso y el equipo adecuado. La aplicación correcta de ambos factores ayudan significativamente al ahorro de tiempo y de recursos económicos; sin embargo, el uso de nuevas tecnologías no garantiza obtener una buena medición en campo. Con la encomienda de reducir gastos y agilizar la toma de datos en el inventario el objetivo de esta investigación fue, desarrollar una propuesta de investigación de un modelo que estime la altura total de los árboles en campo, sin tener que medirlos directamente, aplicando la técnica de redes neuronales artificiales.

## **5.4. MATERIALES Y MÉTODOS**

### **5.4.1. Redes Neuronales Artificiales (RNA)**

Los métodos de análisis estadístico pueden ser utilizados para entender el comportamiento de un sistema biológico de interés, la información del mismo es recolectada de la medición de variables seleccionadas y analizadas aplicando métodos estadísticos o de inferencia del conocimiento. Las redes neuronales constituyen una clase de modelo estadístico, que puede ser utilizado en una amplia gama de aplicaciones, desde análisis exploratorio de datos y visualización hasta problemas de clasificación y regresión (Celis, 2006). Cevallos (2008), menciona que las redes neuronales artificiales son sistemas de procesamiento de información cuya estructura y funcionamiento se basa en un conjunto de elementos simples llamados nodos o neuronas conectadas entre sí que tienen un valor numérico modificable llamado peso, los cuales son calculados mediante la suma de los valores de las entradas que recibe de otras unidades conectadas a ella, comparando esta cantidad con el valor umbral y, si lo iguala o supera, envía una activación o salida a las unidades a las que esté conectada, (Figura 5.1). Las redes neuronales son modelos computacionales inspirados biológicamente, que se componen de un conjunto de nodos de procesamiento simple llamados neuronas, que representan un mapeo entrada/salida de datos (Maithani *et al.*, 2007). Cada neurona se encarga de procesar la información, tanto de fuentes externas como de neuronas vecinas, a través de una función lineal, entregando un valor de salida que usa una función de transferencia, usualmente una función sigmoidea.



**Figura 5.1.** Esquema general de una red neuronal artificial (RNA).

### 5.4.2. Datos dasométricos

Se utilizarán 100,274 registros de datos pertenecientes a las variables (diámetro, altura, edad, fuente) de árboles en plantaciones de eucalipto medidos en los inventarios de 2008 y 2012. Los datos pasaran por un proceso previo de transformación llamado normalización para evitar problemas de tipo numérico durante el proceso de entrenamiento de la red neuronal.

### 5.4.3. Estructura del modelo matemático

El modelo matemático a generar corresponderá a una ecuación agrupada mediante la sumatoria de cada una de las variables principales y las interacciones de primer y segundo orden, más la media poblacional y el error experimental de la variable de respuesta:

$$H_{ijkl} = u + E_i + D_j + F_k + (ExD)_{ij} + (ExF)_{ik} + (DxF)_{jk} + (ExDxF)_{ijk} + e_{ijkl} \quad \text{Ec. 1}$$

Donde:

$H_{ijkl}$ : representa el dato de la variable de respuesta (altura estimada), correspondiente a un tratamiento combinado específico de la edad  $i$ , diámetro  $j$  y la fuente  $k$ , en una determinada parcela o replicación  $l$ .

$\mu$ : representa un valor promedio de la variable de respuesta ( altura estimada) de todos los posibles datos (media poblacional).

$E_i$ : representa el efecto principal de la edad  $i$ ; el valor que se agregaría o disminuiría al valor promedio de la variable de respuesta por efecto de la edad  $i$ ; es decir, lo que aumentaría o disminuiría la edad 1, la edad 2... con relación al valor promedio.

$D_j$ : representa el efecto principal del diámetro  $j$ , el valor que se agregaría o disminuiría al valor promedio de la variable de respuesta por efecto del diámetro  $j$ .

$F_k$ : representa el efecto principal de la fuente genética de origen (clon o semilla)  $k$ , el valor que se agregaría o disminuiría al valor promedio de la variable de respuesta por efecto de la fuente  $k$ .

$(ExD)_{ij}$ : representa el efecto de la interacción de primer orden al combinarse la edad  $i$  con el diámetro  $j$ ; el valor que se agregaría o disminuiría al valor promedio de la variable de respuesta por efecto de esta interacción.

$(ExF)_{ik}$ : representa el efecto de la interacción de primer orden al combinarse la edad  $i$  con la fuente genética de origen  $k$ ; el valor que se agregaría o disminuiría al valor promedio de la variable de respuesta por efecto de esta interacción.

$(DxF)_{jk}$ : representa el efecto de la interacción de primer orden al combinarse el diámetro  $j$  con la fuente genética de origen  $k$ ; el valor que se agregaría o

disminuiría al valor promedio de la variable de respuesta por efecto de esta interacción.

$(ExDxF)_{ijk}$ : representa el efecto de la interacción de segundo orden al combinarse la edad  $i$  con el diámetro  $j$  y la fuente genética de origen  $k$ ; el valor que se agregaría o disminuiría al valor promedio de la variable de respuesta por efecto de esta interacción.

$e_{ijkl}$ : representa el error experimental de la variable de respuesta correspondiente a un tratamiento combinado específico de la edad  $i$ , diámetro  $j$  y fuente genética de origen  $k$ , en una determinada parcela o replicación  $l$ .

#### **5.4.4. Diseño de la red neuronal**

El conjunto de datos pre-procesados se utilizarán para el entrenamiento y prueba de la red neuronal. La red se encontrará estructurada con cuatro neuronas de entrada, que corresponden a los siguientes factores o variables: 1) edad, 2) diámetro, 3) altura, 4) fuente genética de origen y una neurona de salida que corresponde a la altura estimada del árbol bajo estudio. Las variables dependientes del tiempo, como son diámetro, altura, edad, se trabajarán en un rango entre 1-20 años, las cuales se medirán en diferentes años en las plantaciones; pero esto no es una limitante, porque las redes neuronales, al ser un modelo no lineal, no ven afectadas su predicción final por la utilización de datos en diferentes épocas. La parametrización de las variables diámetro y altura se realizará mediante un proceso de estandarización entre (0, 1). Después del proceso de entrenamiento, se evaluará el rendimiento y las capacidades de generalización.

Para obtener una red con una adecuada capacidad predictiva, se seleccionará un algoritmo de entrenamiento con buena capacidad de convergencia, un buen diseño de la arquitectura y preparar un conjunto de datos de entrenamiento

óptimos para obtener así una buena representación de los datos. Para la simulación, se configurará una red neuronal hacia adelante bajo la siguiente arquitectura 4-2-1, entrenada utilizando el algoritmo de retro propagación con una función de activación, tanto para las neuronas ocultas como para la de salida, de tipo sigmoidea. Para el cálculo de la actualización de pesos de las neuronas, se usará la regla delta. Inicialmente, se activaran todas las conexiones utilizando pesos aleatorios (Alkheder y Shan, 2003). La red se entrenará usando 75.000 (corridas), y 25,000 en el análisis de precisión. Con esta configuración, se espera que la red converja para todos los valores por debajo del límite establecido de  $1 \times 10^{-4}$ . La expectativa es tener una red entrenada con el menor error medio cuadrático (RMSE) y un error aceptable en la generalización para llevar a cabo la simulación. El conjunto completo de todos los factores involucrados se tomará en cuenta para la misma arquitectura usando los mejores pesos y sesgos de entrenamiento.

De acuerdo a López *et al.* (2012) el procedimiento sugerido para el desarrollo y validación de la red neuronal es: a) depurar la base de datos fuente; b) transformar (normalizar) los datos para su uso en el entrenamiento de la red; c) entrenar la red usando el 75% de los datos; finalmente d) análisis de la precisión de la red con el 25% restante de los datos.

Se adoptará la métrica conocida como porcentaje de emparejamiento correcto (PCM) para medir la precisión del modelo, donde los valores predichos se compararan con los esperados. El porcentaje de valores que sean similares se dividirán entre el número de valores correctos (Maithani *et al.*, 2007). Para obtener la métrica, se efectuará el cálculo de la siguiente forma:

$$\text{PCM} = (\text{valores correctamente predichos} * 100) / (\text{valores esperados}) \quad \text{Ec. 2}$$

## **5.5. RESULTADOS ESPERADOS**

De acuerdo con Celis (2006), conviene utilizar varios tamaños de red neuronal modificando los valores del error medio cuadrático, de acuerdo con este esquema: 0.1, 0.01, 0.001, 0.0001, 0.00001 y estandarizar los datos de entrenamiento con media 0 y desviación estándar de 1, esperando encontrar una buena generalización para alguno de estos valores como los encontrados por (López et al., 2012). Además se pretende que la red neuronal entrenada sea capaz de predecir la altura, en un 95% con un intervalo de confianza mínimo del 90%, haciendo que la red sea una herramienta adecuada para estimar el comportamiento de esta variable. Finalmente, se aplicará la prueba de t-student pareada, a los datos predichos frente a los datos de validación; según el estudio realizado por López et al. (2012), encontró que con 4.459 grados de libertad, se obtuvo una  $t$  calculada = 0,6835, inmersa entre los valores de  $T = +/-1,96$  con un 95% de intervalo de confianza (-0,000685477, 0 ,001419261), lo que indica que se encuentra en la zona de aceptación de la hipótesis nula. Además, el valor de  $p = 0,4943$  es muy alto, lo cual corrobora que los datos siguen la misma distribución. La diferencia entre las medias de los datos fue de tan solo de 0,0003668919. Esta indica que la red escogida arroja una buena predicción del crecimiento en la altura de los árboles, a pesar de la alta variabilidad inherente al sistema (grupos etéreos, suelos, climas, etc.). En tanto que el error de predicción de acuerdo con la métrica escogida (en porcentaje) arrojó un valor del 9%, el cual posiblemente se produjo por los errores incorporados durante el proceso de captura, depuración y transformación.

## **5.6. CONCLUSIONES ESPERADAS**

Como ya se mencionó, se espera obtener un modelo de red neuronal que estime la altura del arbolado por encima del 90% y que el error de predicción este por debajo del 10%. Además de reducir los costos y el tiempo en la toma de datos en campo al implementarse el modelo a un dispositivo digital (tableta).

## **CAPÍTULO VI. CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES GENERALES**

Los módulos del inventario y el simulador del sistema informático, son confiables en sus estimaciones. En el caso del inventario, la implementación de más estimadores permitió al usuario visualizar diferentes escenarios y tomar la mejor decisión probable, mientras que el simulador ofreció una proyección del volumen proporcionando a los usuarios una mejor perspectiva del comportamiento de la plantación. La calidad del sistema se estableció en un nivel entre bueno y aceptable de entre todos los factores analizados resultando mayoritariamente bueno, es decir, satisface las necesidades esenciales requeridas por el usuario final. El proceso implícito que tiene el sistema para capturar, almacenar y procesar la información, mejoró al proceso anterior en tiempo y administración de datos.

Por otra parte, el uso de una aplicación móvil en una tableta digital excluye la pérdida y daños en los formatos de campo; además que evita la duplicación de trabajo y error de ilegibilidad de datos. La ilegibilidad de los datos se vuelve clara al contar con una interfaz que tiene establecido un tipo y tamaño de letra de forma automática. La duplicación del trabajo se reduce, ya que no se tiene que capturar nuevamente la información. La evaluación de los atributos de calidad estableció que la aplicación tiene un nivel bueno y satisface las necesidades esenciales requeridas. Las medidas de tendencia central utilizadas en la evaluación, media y mediana presentaron un comportamiento semejante, ambas estuvieron dentro del rango establecido para el nivel de calidad buena.

También se obtuvo un estimador de razón (índice de volumen por sitio) que podrá proyectar el volumen futuro de la plantación. Se demostró que existe una subestimación del volumen proyectado por el SCRM con respecto a la remediación y que el estimador de razón lo sobrestima. Lo ideal sería considerar de forma integral ambos métodos para predecir el volumen por sitio, ya que la

proyección del mismo se encuentra entre ambos valores. Finalmente se espera obtener un modelo de red neuronal que estime la altura del arbolado por encima del 90% y que el error de predicción este por debajo del 10%. Además de reducir los costos y el tiempo en la toma de datos en campo al implementarse el modelo a un dispositivo digital (tableta).

## CAPÍTULO VII. LITERATURA CITADA

- Addetla, S., M. Gorde, S. Ghadge, S. Kusal, and A. M. Bongale. 2014. Design of mobile event management and broadcast system using rational unified process. *International Journal of Computer Science and Mobile Computing* 3 (4): 412 – 421.
- Ahmad, B., M. Javed, S. Ahmad, I. A. Khan, M. Ahmad y S. M. Saqib. 2011. Exploring documentation: a trivial dimension of RUP. *Computer Engineering and Intelligent Systems* 2 (6): 72-77.
- Alonso, M. C. E., B. D. Ospina. 2001. Un tamaño de muestra preliminar en la estimación de la media, en poblaciones con distribuciones uniformes y triangulares. *Revista Colombiana de Estadística* 24: 27-32.
- Anwar, A. 2014. A review of RUP (Rational Unified Process). *International Journal of Software Engineering* 5(2): 8-24.
- Arias, D., 2004. Estudio de las relaciones altura-diámetro para seis especies maderables utilizadas en programas de reforestación en la Zona Sur de Costa Rica. *Kurú: Revista Forestal Costa Rica* 1(2):1-11.
- Benítez, G. J. P. y R. Ramírez. 2013. Evaluación de la calidad sobre la aplicación móvil fiscal para el cálculo de la PTU en empresas Mexicanas. *Revista Iberoamericana para la investigación y el desarrollo educativo* 3(6): 219-236.
- Boca, R.T., A. E. Keller, C. Mastrandrea, E. H. Crechi, S. R. Barth, R. A. Winck, H. E. Fassola, y P. Ferrere. 2015. Estimación del volumen sin corteza en *Eucalyptus grandis* utilizando modelos de regresión con variables instrumentales en dos etapas de plantaciones de la Mesopotamia Argentina. *RIA* 41(2):201-207.
- Celis P. J., 2006. Estimación del crecimiento de un bosque de pino (*Pinus cooperi* blanco) por medio de una red neuronal backpropagation entrenada con índices de competencia independientes de la distancia. *Computación y Sistemas* 10(4):415-427.

- Cevallos A. J., 2008. Redes Neuronales de Base Radial aplicadas a la mejora de la calidad. *Revista Industrial Data* 11(2):63-72.
- Chiari, R., O. E. Carrero, M. Jerez, M. A. Quintero, y J. Stock. 2008. Modelo preliminar para la planificación del aprovechamiento en plantaciones forestales industriales en Venezuela. *Interciencia* 33: 802-809.
- Cobo, B., C. Batanero. 2000. La mediana en la educación secundaria obligatoria: ¿un concepto sencillo? *ResearchGate* 23:85-96.
- Codd, E. F. 1970. A Relational Model of Data for Large Shared Data Banks. *Communications of the ACM*. 13 (6): 377-387.
- Comisión Nacional Forestal (Conafor) 2009. Situación actual y perspectivas de las plantaciones forestales comerciales en México. Comisión Nacional Forestal - Colegio de Postgraduados. Montecillo, Texcoco, Estado de México, México. 429 p.
- Da Cunha, T. A., C. A. Guimaraes. 2009. Modelo de regresión para estimar el volumen total con corteza de árboles de *Pinus taeda* L. en el sur de Brasil. *Kurú: Revista Forestal (Costa Rica)* 6(16):1-15.
- Diamantopoulou, M.J., R. Özçelik. 2012. Evaluation of different modeling approaches for total tree-height estimation in Mediterranean Region of Turkey. *Forest Systems* 21(3): 383-397.
- Diéguez, A.U., M. Barrio, F. Castedo, y J. G. Álvarez. 2005. Relación altura-diámetro generalizada para masas de *Pinus sylvestris* L. procedentes de repoblación en el noroeste de España. *Invest Agrar: Sist Recur For* 14(2):229-241.
- Dhawan, S. 2012. Software metrics a tool for measuring complexity. *International Journal of Software and Web Sciences* 2 (1): 4-7.
- EdrawSoft, 2009. Edraw Max 5 system for Windows. Release 5.0.
- Galán, R., H. M. de los Santos, y J. Valdez. 2008. Crecimiento y rendimiento de *cedrela odorata* L. y *Tabebuia donnell-smithii* Rose en San José Chacalapa, Pochutla, Oaxaca. *Madera y Bosques* 14 (2): 65-82.

- García, G., M. A. Moraga, F. García, and M. Piattini. 2013. The influence of process quality on product usability: a systematic review. *Clei Electronic Journal* 16 (2): 1-13.
- Gasca, M. M. C., A. L. L. Camargo, y D. B. Medina. 2014. Metodología para el desarrollo de aplicaciones móviles. *Tecnura* 18(40):20-35.
- Gómez, T. J., H. M. De los Santos, A. M. Fierros, J. R. Valdez. 2009, Modelos de crecimiento en altura dominante para *Eucalyptus grandis* Hill ex (Maiden) y *E. urophylla* S. T. (Blake) en Oaxaca, México. *Revista Fitotecnia Mexicana* 32:161-169.
- González, G. M., C. Hevia, A. M. Barrio. 2013. Modelo dinámico de crecimiento y producción de biomasa para cultivos energéticos de *Eucalyptus nitens* (Maiden) en el noroeste de España. *Sociedad Española de Ciencias Forestales*, junio 1-8.
- Greiner, C., G. Dapozo, J. Acosta, y J. Chiapello. 2014. Medición de software como aporte a la gestión cuantitativa de proyectos. *Workshop de Investigadores en Ciencias de la Computación, WICC*, 580-585.
- Haleem, M., M. Rizwan, and S. F. Ahmad. 2013. Overview of impact of requirement metrics in software development environment. *International Journal of Advanced Research in Computer Engineering & Technology* 2 (5): 1811-1815.
- Hernández, G. A. 2004. Un método para el diseño de bases de datos a partir del modelo orientado a objetos. *Computación y Sistemas* 7 (4): 224-238.
- Hipp, R. 2013. SQLite RDBMS system for Windows. Release 3.7.16.1.
- IBM, 2008. SQL system for Windows.
- Ledo, A., S. Condés, y F. Montes. 2012. Revisión de índices de distribución espacial usados en inventarios forestales y su aplicación en bosques tropicales. *Revista Perú Biología* 19(1):113-124.
- López, J., C. Arce, y R. Arévalo. L. 2012. Aplicación de la técnica de redes neuronales para la predicción de la altura de árboles de algunas especies maderables promisorias presentes en plantaciones forestales de Colombia. *Revista Tumbaga* (7): 97-106.

- López, M. A. 2005. Un procedimiento alternativo al tradicional para la medición de alturas con clinómetro. *Madera y Bosques*, 11(2): 69-77.
- Macías, J. E., y J. M. Gómez. 2010. Utilizando el Modelo de Calidad de McCall y el estándar ISO-9126 para la evaluación de la calidad de sistemas de información por los usuarios. *Americas Conference on Information Systems (AMCIS)*, agosto 12-15.
- Maithani, S., R. K. Jain, y M. K. Arora. 2007. An artificial neural based approach for modelling urban spatial growth. *ITPI Journal* 4(2):43-51.
- Marcos, M. C., B. Mesa, M. Ortega, H. Benmakhlouf, P. Dwelle, P. Hernández, J. M. Pérez, I. Renau, I. Serván, E. Davradou, F. López, P. Malvar, A. Mayor, y A. Morales. 2006. Evaluación de la usabilidad en sistemas de información terminológicos online. *Hipertext.net* 4:18-23.
- Marques da Silva, M. L., D. H. Breda y H. García 2013. Application of artificial neural networks to estimate the height of even-aged stands of eucalyptus. *Revista Árvore Viçosa-MG* 37(4):639-645.
- Martinez, R., H. S. Azpiroz, J. L. Rodriguez, V. M. Cetina, y M. A. Gutiérrez. 2006. Importancia de las plantaciones forestales de Eucalyptus. *Ra Ximhai* 2 (3): 815-846.
- Méndez M. J. T., S. E. García, B. D. Juan, L. Ángel. 2008. Diagnóstico fitosanitario en plantaciones forestales comerciales en Las Choapas, Veracruz y Huimanguillo, Tabasco. Comisión Nacional Forestal. Gerencia Nacional de Sanidad. Universidad Autónoma Chapingo. Texcoco, Estado de México, México. 97 p.
- Microsoft, 2010. Microsoft Access system for Windows. Release 14.0.6123.500.
- Morales, Ll., M. I. González. 2003. Comparación de las técnicas de análisis de variancia y regresión lineal múltiple: Aplicación a un experimento de almacenamiento de mango *Agronomía Costarricense*. 27(2): 43-53.
- Návar, C. 2010. Los bosques templados del estado de Nuevo León: el manejo sustentable para bienes y servicios ambientales. *Madera y Bosques* 16(1):51-69.

- Nazir, M., R. A. Khan, and K. Mustafa. 2010. A metrics based model for understandability quantification. *Journal of Computing* 2 (4): 90-94.
- Nirpal, P. B., and K. V. Kale. 2011. A brief overview of software testing metrics. *International Journal on Computer Science and Engineering* 3 (1): 204-2011.
- Pereira, A. 2011. Un perfil UML 2.0 para el modelado de planes del entrenamiento deportivo. *Revista Avanzada Científica* 14 (1): 1-13.
- Pereira, E., J. I. Encinas y A. V. Rezende. 2012. Evaluación de procedimientos simplificados en la cuantificación volumétrica de una plantación de pino. *Colombia Forestal* 15 (1): 131-138.
- Pérez, G. G., D. M. Domínguez, Z. P. Martínez, y B. J. D. Etchevers. 2012. Caracterización dasométrica e índice de sitio en plantaciones de caoba en Tabasco, México. *Madera y Bosques* 18(1):7-24.
- Pérez, M. O., y Y. Zuleta. 2013. Proceso para gestionar riesgos en proyectos de desarrollo de software. *Revista Cubana de Ciencias Informáticas* 7(2):206-221.
- Pérez, S. R. 2010. Características edafológicas y potencial productivo de *Eucalyptus urophylla* y *E. grandis* en Huimanguillo, Tabasco. Tesis de Maestría. Colegio de Postgraduados. Montecillo, Estado de México, México. 74 p.
- Ramani, R. 2007. Measuring client satisfaction using quality in use. *The Quarterly Journal of the TickIT Software Quality Certification Scheme* 1 (7): 5-11.
- Rajo, A., R. Rodríguez, F. Rodríguez, F. Castedo y J.A Grandas. 2004. Dispositivos experimentales permanentes de gestión forestal sostenible para el estudio de modelos de crecimiento forestales en Galicia. *Cuaderno de la Sociedad Española de Ciencias* 18: 255-260.
- Roldan, M. A., H. M. De Los Santos, H. Ramírez, J. R. Valdez, G. Ángeles, A. Velázquez. 2013. Estimadores de muestreo para inventario de plantaciones forestales comerciales de eucalipto en el sureste mexicano. *Revista Mexicana Ciencias Forestales* 5(26):38-57.

- Salawa, P. 2013. SQLiteStudio system for Windows. Release 2.1.5.
- Santiago, G. W., H. M. De los Santos, G. Ángeles, J. R. Valdez, G. Ramírez. 2013. Sistema compatible de crecimiento y rendimiento para rodales coetáneos de *Pinus patula*. Revista Fitotecnia Mexicana 36: 163-172.
- Sun Microsystems/Oracle Corporation, 2013. Netbeans IDE system for Windows. Release 7.4.
- Sun Microsystems/Oracle Corporation, 2006. Java system for Windows. Release javaSE 7.
- Trincado, G., K. V. Gadow, V. Sandoval. 1997. Estimación de volumen comercial en latifoliadas. Bosque 18: 39-44.
- Velasco, B, H. Ramírez, F. Moreno, A. De la Rosa. 2003. Estimadores de razón para el inventario nacional forestal de México. Revista Ciencia Forestal en México 28(94):23-44.
- Velázquez, M. A., A. M. Fierros G., A. Aldrete, A. Gómez G., H. M. De los Santos, M. González G., J. López U., T. Llanderal O. y S. Fernández C. 2009. Situación actual y perspectivas de las plantaciones forestales comerciales en México. Comisión Nacional Forestal - Colegio de Postgraduados. México. 429 p.
- Yadav, k., Y. Singh y S. Yadav. 2011. Software project metrics & measurement. VSRD International Journal of CS & IT 1 (10): 711-719.
- Zavala, M., C. Fuentes y H. Saucedo. 2014. Programa de cómputo para analizar la dinámica del agua en sistemas de drenaje agrícola subterráneo. Agrociencia 48: 71-85.