

**INSTITUTO TECNOLÓGICO DE COSTA RICA
ESCUELA DE INGENIERÍA FORESTAL**

**Desarrollo de un programa de silvicultura intensiva y de
precisión para el aumento de la productividad de
plantaciones forestales.**

**Fase 1. Preparación de sitio y aplicación de enmiendas
en plantaciones recién establecidas**

Mario Guevara Bonilla (Coordinador)

Edwin Esquivel Segura

Rodolfo Canessa Mora

Federico Masís Meléndez

Andrea Tapia Arenas

Vicerrectoría de Investigación y Extensión

Junio 2020

TABLA DE CONTENIDOS

Datos generales	3
RESUMEN	4
INTRODUCCIÓN	5
Marco teórico	7
MATERIALES Y MÉTODOS	11
Sitio de estudio	11
Establecimiento de la plantación	12
Diseño experimental	12
Variables evaluadas	13
Evaluación de la calidad de la mecanización	13
Análisis estadístico	13
Establecimiento de la plantación	14
Diseño experimental	14
Variables evaluadas	15
Análisis estadístico	16
Generación de un protocolo automático para la interpretación de análisis de suelos.	16
Escogencia del vehículo aéreo no tripulado a utilizar y selección de actividades silviculturales a monitorear	18
Generación de un flujo de trabajo para la obtención de los productos con base en las actividades seleccionadas	18
Validación del flujo de trabajo a través de un ejercicio práctico.	18
RESULTADOS	20
Propiedades físicas del suelo	20
Evaluación del proceso de mecanización	22
Propiedades químicas del suelo	24
Generación de un protocolo automático para la interpretación de análisis de suelos.	26
Análisis financiero	29
Selección del vehículo aéreo no tripulado y selección de actividades silviculturales a monitorear	30
Flujo de trabajo para las variables seleccionadas	31
Validación del flujo de trabajo	32
Productos obtenidos de este objetivo	34
DISCUSIÓN	36
Transferencia y divulgación de resultados	41
Conclusiones	43
Recomendaciones	44
Referencias	45
ANEXOS	48

DATOS GENERALES

1.1. Código del proyecto

1401066

1.2. Nombre del proyecto

Desarrollo de un programa de silvicultura intensiva y de precisión para el aumento de la productividad de plantaciones forestales.

Fase 1: Preparación de sitio y aplicación de enmiendas en plantaciones recién establecidas

1.3. Escuela responsable

Escuela de Ingeniería Forestal

1.4. Otras escuelas participantes

Escuela de Ingeniería Agrícola
Escuela de Química

1.5. Instituciones o empresas participantes externas al TEC

Maderas Cultivadas de Costa Rica

1.6. Investigador coordinador

Mario Guevara Bonilla, M.Sc.

1.7. Investigadores colaboradores

Edwin Esquivel Segura, PhD.
Rodolfo Canessa Mora, M.Sc.
Federico Masís Meléndez, PhD.
Andrea Tapia Arenas

1.8. Período de ejecución

Enero 2018 – diciembre 2019.

RESUMEN

La falta de paquetes tecnológicos referentes a las técnicas correctas y eficientes de preparación de sitios y manejo nutricional de las plantaciones es una de las serias deficiencias que presenta el sector reforestador costarricense. Con la finalidad de revertir esta situación esta propuesta de investigación tuvo como objetivo principal aumentar la productividad y calidad de plantaciones forestales en Costa Rica.

Como primera fase, este proyecto evaluó mediante ensayos individuales con diseños estadísticos robustos el efecto de labrar el suelo en profundidad y de la aplicación de cal en distintas formas en el crecimiento inicial de los árboles y en las propiedades físicas y químicas del suelo. Se realizaron mediciones periódicas donde se evaluó el crecimiento de los árboles, las propiedades físicas y químicas del suelo. Adicionalmente se evaluó mediante un estudio de tiempos y movimientos y determinación de costos, cuál de los tratamientos es financieramente más rentable. Adicionalmente se realizaron los primeros vuelos con aeronaves piloteadas a distancia para la determinación de un flujo de trabajo.

En los resultados se evidenció un efecto positivo en las propiedades del suelo al mecanizar y encalar, pero no se detectaron diferencias entre tratamientos para el crecimiento de los árboles. El poco tiempo de establecimiento del ensayo de labranza y deficiencias en el manejo de malezas en el ensayo de cal afectaron los resultados. Con relación a los costos se determinó que los costos de utilizar maquinaria pesada para realizar procesos de mecanización son elevados. Los tratamientos que realizan dos pasadas de subsolador son mucho más caros que realizar el proceso de labranza una sola vez. Encalar solo la rodaja de los árboles es más barato que realizar una aplicación en banda o total.

Mediante el uso de aeronaves piloteadas a distancia se logró realizar un flujo correcto para la planificación de vuelos con RPAS y se lograron calcular áreas y estimar alturas con precisión. Una de las principales recomendaciones para futuros estudios es el continuar estudiando y mejorando las limitantes de las plantaciones forestales con el objetivo de obtener mayor crecimiento en menor tiempo.

Palabras clave: manejo, enmiendas, labranza, aeronaves piloteadas a distancia.

INTRODUCCIÓN

El cultivo de árboles con fines productivos es imprescindible para el cumplimiento de las metas establecidas en el Plan Nacional Forestal de Desarrollo (PNDF) 2011-2020, la Estrategia REDD+, la mitigación del cambio climático y la contribución a la carbono neutralidad del país. Además, el Fondo Nacional de Financiamiento Forestal (FONAFIFO) ha establecido valores mínimos de referencia de diámetro y altura para poder obtener los desembolsos anuales de los proyectos que actualmente tienen pago por servicios ambientales (PSA).

De acuerdo con estadísticas de la Oficina Nacional Forestal (2016) la tasa anual de reforestación en el país ha disminuido considerablemente. Un ejemplo de lo anterior es que el FONAFIFO, en concordancia con el Plan Nacional de Desarrollo Forestal (PNDF) 2011-2020, asignó recursos para reforestar 7 000 ha por año, y plantar 750 000 árboles por año en sistemas agroforestales, sin embargo, solo se ha podido alcanzar en promedio un 50% de esta meta. Esta disminución en el área plantada en los últimos años ha generado un desabastecimiento de materia prima de calidad.

Entre las causas de la disminución de la reforestación en Costa Rica se mencionan problemas de financiamiento, problemas de mercado y principalmente la baja productividad de las plantaciones debido a la escogencia de sitios con serias limitaciones físicas (compactación) y químicas (suelos con problemas de acidez), el desconocimiento de técnicas correctas y eficientes de preparación de sitios, y manejo nutricional de las plantaciones (falta de paquetes tecnológicos adecuados).

Una alternativa para resolver estos problemas es la aplicación de técnicas de manejo intensivo. Como primera estrategia, el país apostó por el mejoramiento genético; sin embargo, paralelamente a un buen programa de mejoramiento genético es necesario implementar paquetes tecnológicos modernos y adecuados que permitan a los árboles aprovechar su potencial de crecimiento.

A pesar de los esfuerzos realizados mediante el proyecto de investigación Mejoramiento tecnológico de suelos para el incremento de la productividad en plantaciones de *Tectona grandis* y por autores como Alfredo Alvarado los cuales hacen recomendaciones acerca de técnicas correctas de mecanización y manejo de la fertilidad en plantaciones forestales, actualmente no existe un paquete silvicultural definido ni desarrollado referente a técnicas adecuadas e intensivas de preparación de sitio y aplicación de enmiendas en plantaciones forestales.

Es en este punto donde el presente proyecto de investigación a llenar los vacíos de conocimiento existentes en el tema de mecanización y en procesos de encalado existentes en el sector forestal costarricense. Además, es el primer proyecto de investigación dentro de la Escuela de Ingeniería Forestal que aplicó la temática de silvicultura de precisión en plantaciones forestales, específicamente mediante el uso de vehículos aéreos no tripulados, convirtiéndolo en un proyecto innovador.

Este proyecto es la primera fase de tres en total, que tienen como objetivo principal aumentar la productividad y calidad de las plantaciones forestales en Costa Rica. El planteamiento del proyecto estuvo basado en los siguientes objetivos específicos.

1. Cuantificar el efecto de la mecanización (labranza profunda) en el desarrollo inicial de plantaciones forestales y en el mejoramiento de las propiedades físicas del suelo.
2. Evaluar el efecto de la aplicación de enmiendas en el crecimiento inicial de plantaciones forestales.
3. Realizar el análisis financiero de la inversión en la mecanización y aplicación de enmiendas en plantaciones forestales recién establecidas.
4. Monitorear actividades de preparación de sitio y establecimiento de plantaciones mediante el uso de vehículos aéreos no tripulados.
5. Transferir los conocimientos y las experiencias generadas a los grupos meta.

MARCO TEÓRICO

La productividad de un sitio se relaciona con la capacidad productiva de un bosque o una plantación en un ambiente dado en términos de volumen de madera (m^3) producida por unidad de superficie (ha^{-1}). Por otra parte, la silvicultura se basa en la teoría y la práctica de controlar el establecimiento, la composición, la calidad y la productividad de un rodal forestal para cumplir determinados objetivos de manejo (Espinosa y García, 2017).

A nivel mundial la silvicultura tanto de bosques como de plantaciones ha evolucionado de una silvicultura “generalista” a una silvicultura más intensiva, sitio específico y de acuerdo al producto a obtener. La utilización de sensores de alta tecnología y herramientas analíticas para el manejo sitio específico de un rodal se conoce como silvicultura de precisión (Dyck 2003).

Dyck (2003) al discutir aspectos relacionados a la silvicultura de precisión, menciona que el sector forestal debe enfocarse en los materiales genéticos, los sitios y en las prácticas silviculturales para producir la mejor madera de calidad demandada por el mercado. Un manejo forestal eficiente requerirá de sistemas integrados que incorporen un amplio rango de tecnología apropiada y oportuna incluyendo el mejoramiento genético forestal, control de malezas, y manejo de la nutrición (Jokela, et al., 2010).

En Costa Rica gracias al aporte de GENFORES y sus proyectos de investigación en el campo del mejoramiento genético han causado un aumento en el rendimiento de las plantaciones; sin embargo, este aumento en el rendimiento no ha estado acompañado con una silvicultura intensiva y adecuada a los nuevos requerimientos de las plantaciones. Un manejo silvicultural de plantaciones con el fin de aumentar los rendimientos y que estos sean sustentables, en el tiempo incluye además del mejoramiento genético, una adecuada preparación de sitio, un adecuado control de arvenses y la corrección de deficiencias de acidez y nutrientes (Mead, 2005).

Silvicultura intensiva y establecimiento de plantaciones

En el proceso de establecimiento de plantaciones comerciales se deben considerar las características de suelo, ya que es uno de los aspectos de mayor importancia en su desarrollo (Khanduri et al., 2008). La mayoría de especies utilizadas en nuestro país, requieren de suelos con densidad aparente y porcentajes de saturación de acidez baja, con niveles nutricionales elevados, drenajes profundos y poca pendiente (Khanduri et al., 2008).

Para contrarrestar los procesos de compactación del suelo, se han desarrollado actividades como la labranza o mecanización que generan cambios en la estructura (Aruga et al., 2013) y en la densidad (Engler et al., 2016), mejoran la aireación y generan variaciones en el movimiento superficial e interno del agua e inclusive en

la disponibilidad de nutrientes y materia orgánica (Bottinelli et al., 2014). Lo anterior estimula, en el mediano plazo, el crecimiento de las especies forestales y con ello la reducción de los turnos de cosecha y el incremento en la calidad de la madera (Culshaw y Stokes, 1995).

A nivel nacional destacan los trabajos de Briceño et al. (2016) y Valverde et al. (2017) que muestran el efecto de la mecanización de suelos en las propiedades físicas y en el desarrollo de área foliar en plantaciones establecidas. Adicionalmente en el proyecto de investigación mejoramiento tecnológico de suelos para el aumento de la productividad de plantaciones forestales, se promovió el uso de mega camellones como alternativa de mejoramiento de las propiedades físicas del suelo y aumento del crecimiento inicial de plantaciones recién establecidas. A pesar de estos esfuerzos, a nivel nacional no existen evidencias documentadas del efecto de la labranza vertical (mecanización profunda) ni la profundidad adecuada de mecanización en plantaciones forestales recién establecidas.

Para evaluar los efectos de la labranza en el tiempo se han desarrollado múltiples pruebas como análisis de desarrollo radicular (Tewari et al., 2014), análisis nutricionales foliares (Fernández-Moya y Alvarado, 2014), pruebas de compactación, infiltración y estructura de suelo (Yoshifuji et al., 2009) y análisis de índice de área foliar (IAF) (Vyas et al., 2010; Zhang et al., 2011). Este último análisis es uno de los más efectivos porque cuantifica el nivel de crecimiento aéreo de un individuo (Aruga et al., 2013) y el efecto de condiciones ambientales del sitio (Vyas et al., 2010).

Silvicultura intensiva y manejo nutricional

En sistemas silviculturales intensivos, el manejo nutricional es un tema clave en donde la aplicación de enmiendas y la fertilización juegan un doble rol; a) aumentar la productividad, b) compensar la extracción de nutrientes por parte de los árboles para así lograr mantener la sustentabilidad del sistema en el tiempo (Fernández-Moya et al, 2017).

Adekunle et al. (2011) encontraron que hay una relación alta y positiva entre algunas propiedades químicas del suelo y las variables de crecimiento de los árboles de *Gmelina arborea* y *Tectona grandis*. El mayor coeficiente de correlación encontrado es entre la concentración de fósforo y el área basal para ambas especies. Los valores r^2 son 0,98 y 0,96 para melina y teca, respectivamente, también se obtuvo un coeficiente de correlación alto y positivo entre el potasio y el área basal para la teca.

Sin embargo, el pH podría afectar también la disponibilidad nutricional, tal y como lo presenta Alvarado y Raigosa (2012); por un lado las plantaciones forestales son susceptibles a valores inferiores en el pH de 5,5 y por otra parte las plantaciones forestales continúan acumulando nutrientes en su biomasa toda la vida, por lo que

de una manera se podría entender que el disminuir la disponibilidad nutricional de las plantaciones forestales disminuirá lógicamente su rendimiento o alargará el turno.

Lo anterior se ha evidenciado en plantaciones forestales establecidas en proyectos previamente ejecutados en el Centro de Investigación en Innovación Forestal (CIF) se han observado valores de pH de hasta 4,5 y valores de saturación de acidez mayores al 45 %, lo que limitó la productividad de esas plantaciones (Arias *et al* 2016).

Por otra parte, existe la preocupación de que la alta tasa de crecimiento de especies como teca y melina, y una silvicultura intensiva podrían conducir al agotamiento de los nutrientes del suelo. Algunos resultados muestran que las plantaciones deberían tener rotaciones de 25 años ya que una rotación inferior conducirá muy probablemente a la disminución constante de nutrientes (Onyekwelu *et al.*, 2006), para nuestro caso las rotaciones de Melina son inferiores a los 12 años. Onyekwelu *et al.* (2006) encontraron acumulaciones de hasta el 80% de los nutrientes en el fuste por lo que solamente queda un 20% de los nutrientes en estructuras no sujetas a extracción en un sitio. Algunos de los nutrientes acumulados principalmente en el fuste y en la corteza son Ca y Mg, fuertemente relacionados al control de la acidez del suelo.

Finalmente, a pesar de la importancia internacional de especies como teca y melina para satisfacer la creciente demanda mundial de productos de madera (Onyekwelu *et al.*, 2006), existen pocos estudios en América Latina que traten sobre el manejo de la nutrición y aplicación de fertilizantes. Al igual que en especies como el eucalipto, los resultados encontrados para ambas especies han sido inconsistentes, principalmente cuando los rodales han alcanzado el cierre de copas (Albaugh *et al.*, 2015). Algunas de las razones para esta falta de respuesta incluyen sitios con fertilidad natural alta (Stape *et al.*, 2010) o que otros recursos (principalmente la disponibilidad de agua) es el recurso limitante.

Aeronaves piloteadas a distancia como herramienta de precisión para el monitoreo de actividades forestales

Al igual que muchas otras actividades productivas la actividad forestal necesita adaptarse a los cambios que vienen con la Revolución Industrial 4.0. La Revolución Industrial 4.0 se caracteriza por el uso intensivo de sistemas ciber-físicos para llevar a cabo labores que actualmente son realizadas mediante uso intensivo de mano de obra. Una de estas nuevas herramientas son las Aeronaves Piloteadas a Distancia (RPAS por sus siglas en inglés) o drones como se les conoce popularmente y las actividades de monitoreo y evaluación de plantaciones forestales son una de las actividades en las que los RPAS pueden tener múltiples aplicaciones.

Aguilar (2016) menciona que en el sector forestal se han logrado observar diversas aplicaciones para el uso de RPAS como el conteo y medición de árboles, monitoreo

del estado de bosques y plantaciones forestales, caracterización del uso de la tierra, estudios de fotointerpretación, identificación de especies, estado fitosanitario de los individuos y evaluación del estrés hídrico de la cobertura vegetal.

Por su parte, Banu et al. (2016) encontraron diversos estudios que muestran ejemplos de las aplicaciones de los RPAS para la planificación y manejo forestal sostenible, estudios de dinámica y estructura del bosque, determinación de volumen, mapeo, detección de infestación de plagas, conteo de árboles y determinación de altura del dosel. Además de otras actividades con gran potencial de desarrollo en el futuro con el avance de esta tecnología como lo son la detección de especies en rodales, evaluación de la perturbación de los bosques, identificación de brechas en los claros como indicadores de biodiversidad, (Tang y Shao 2015), entre otros.

MATERIALES Y MÉTODOS

Las metodologías para el cumplimiento de cada objetivo específico se muestran a continuación

Objetivo específico 1. Cuantificar el efecto de la mecanización (labranza profunda) en el desarrollo inicial de plantaciones forestales y en el mejoramiento de las propiedades físicas del suelo

Sitio de estudio

El ensayo se estableció en una finca propiedad de la empresa Maderas Cultivadas de Costa Rica (MCC), ubicada en la Región Huetar Norte en El Concho de Pocosol, San Carlos, Alajuela. ($10^{\circ}47'11,40''$ N; $84^{\circ}28'00,48''$ O) (Figura 1).



Figura 1. Sitio de ubicación del ensayo de labranza en profundidad.

Establecimiento de la plantación

El ensayo se estableció en junio del 2019. El material utilizado para la siembra corresponde a clones de *Gmelina arborea* procedentes de la empresa MCC. El diseño de plantación es rectangular con un distanciamiento de 3 metros entre árboles x 4 metros entre filas. La finca anteriormente tuvo varios ciclos de producción de melina.

Diseño experimental

Se utilizó un diseño completamente aleatorio donde se aplicaron los 4 tratamientos para ello se establecieron parcelas temporales en cada momento de medición.

Los tratamientos aplicados fueron los siguientes:

1. T1: Subsulado a 90 cm de profundidad sobre la línea de siembra
2. T2: Subsulado a 50 cm de profundidad sobre la línea de siembra
3. T3: Subsulado “en cruz” (2 aplicaciones) a 90 cm de profundidad.
4. T4: Subsulado “en cruz” (2 aplicaciones) a 50 cm de profundidad

Cada unidad experimental o parcela efectiva constó de 36 árboles. Los tratamientos se aplicaron previo al establecimiento de los árboles. Para la aplicación de los tratamientos se utilizó un tractor de oruga Caterpillar D6 (figura 2). Adicionalmente se les realizó un control de malezas cada vez que fue necesario.



Figura 2. Maquinaria utilizada para la realización del ensayo.

Variables evaluadas

a) Medición de propiedades físicas del suelo

Previo a la mecanización se tomaron mediciones de densidad aparente mediante el método del cilindro a profundidades de 0 - 20 cm y 20 – 40 cm en el perfil de suelo. Se realizaron 20 puntos de muestreo distribuidos aleatoriamente en el área de estudio. Adicionalmente se midió la resistencia a la penetración hasta una profundidad de 80 cm en el perfil del suelo mecanizado con un penetrómetro manual con 9 puntos de muestreo por bloque.

Posteriormente en cada uno de los bloques se repitieron las mediciones a los 6 meses de establecido el ensayo.

b) Crecimiento en diámetro y altura

Se midieron las variables altura (h) y diámetro a 1,30 m de altura (d) de los árboles en cada tratamiento para estimar el crecimiento en cada una de estas variables.

Evaluación de la calidad de la mecanización

Como una actividad adicional, se desarrolló una metodología que evaluó calidad del proceso de mecanización de suelo en plantaciones forestales. Esta metodología registra dos tipos de información: (i) información general sobre variables del sitio y (ii) información detallada sobre las variables a evaluar en el suelo. El formulario de campo que evalúa distintas variables del suelo y del uso de la maquinaria respectiva se presenta en el Anexo 1. Para mayor detalle de la metodología ver el artículo relacionado.

Análisis estadístico

Los datos se analizaron mediante un Análisis de varianza (ANDEVA). Se analizaron los supuestos del ANDEVA mediante la prueba de Shapiro Wilks (normalidad) y la prueba de Levene para la homocedasticidad. Para determinar si existieron diferencias significativas entre los tratamientos se aplicó una prueba de Tukey ($p < 0,05$).

Objetivo específico 2. Evaluar el efecto de la aplicación de enmiendas en el crecimiento inicial de plantaciones forestales

El ensayo se estableció en una finca propiedad de la empresa Maderas Cultivadas de Costa Rica (MCC), ubicada en Crucitas, Región Huetar Norte de Costa Rica, específicamente en Pocosol de San Carlos, Alajuela (10°51'47.93" N; 84°22'03.61" O) (Figura 3).

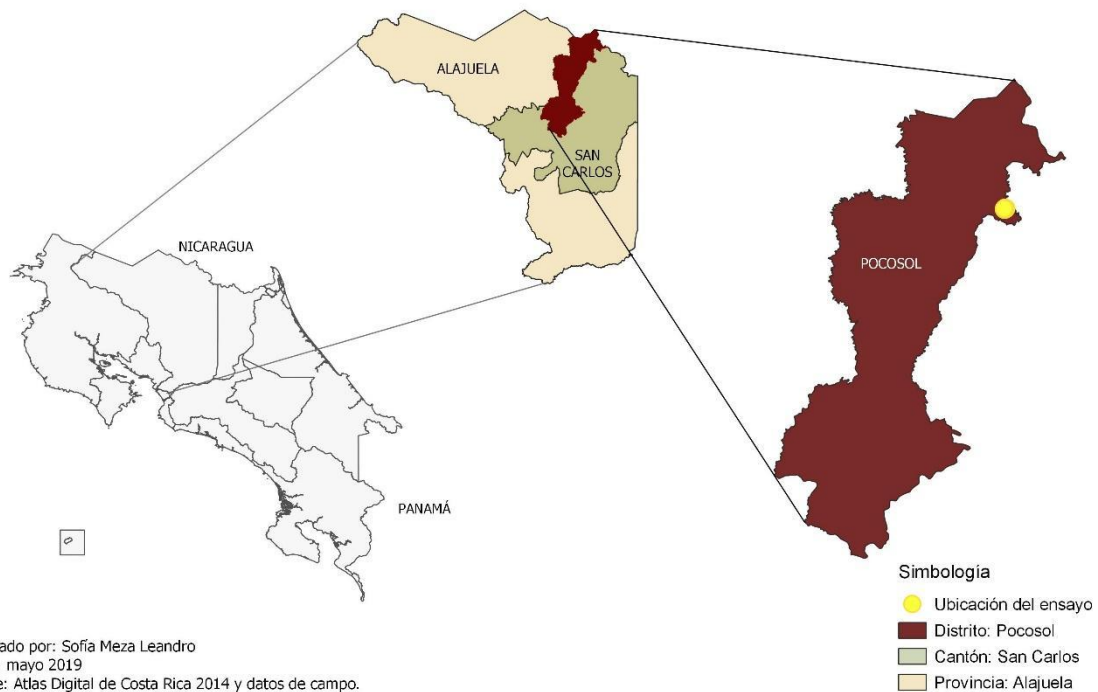


Figura 3. Ubicación del ensayo de control de acidez en una plantación de *Gmelina arborea* (melina) recién establecida, Pocosol de San Carlos.

Establecimiento de la plantación

El ensayo se estableció en agosto del 2018. El material utilizado para la siembra corresponde a clones de *Gmelina arborea* procedentes de la empresa MCC. El diseño de plantación es rectangular con un distanciamiento de 3 metros entre árboles, 4 metros entre filas. Cabe destacar que el uso anterior de la finca era una plantación de melina, es decir, el proyecto se trata de un ciclo nuevo. Además, el sitio no fue mecanizado para el establecimiento actual.

Diseño experimental

Para la aplicación de los tratamientos se utilizó el diseño experimental de bloques completos al azar, con 4 tratamientos y 6 repeticiones. Los tratamientos se asignaron de manera aleatoria y hacen referencia a la cantidad de área que se

aplicó del material encalante (figura 2), la cual se calculó con base en los resultados de un análisis de suelo previo. Cabe destacar que la dosis de cal por hectárea aplicada es igual para cada parcela. Los tratamientos aplicados fueron:

1. Tratamiento 1 (testigo): rodaja de 1 metro (25% del área cubierta).
2. Tratamiento 2: rodaja de 1,5 metro (33% del área cubierta).
3. Tratamiento 3: banda de 2 metros (50% del área cubierta).
4. Tratamiento 4: aplicación total (100% del área cubierta).

Cada unidad experimental está conformada por 8 filas de 14 árboles, dejando un área de borde de 2 de árboles y 2 filas, siendo la parcela efectiva de un total de 40 árboles distribuidos en 4 filas de 10 árboles.

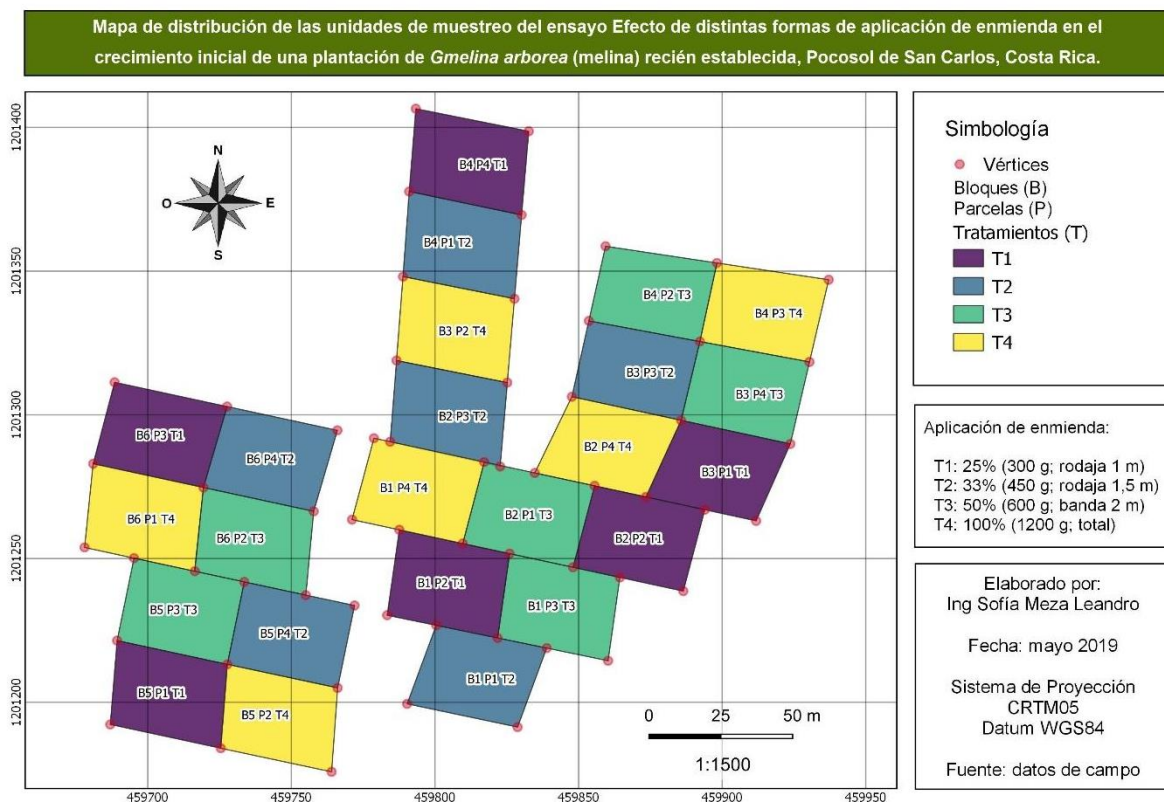


Figura 4. Mapa de distribución de las unidades de muestreo del ensayo.

Variables evaluadas

- a) Crecimiento en diámetro y altura

Se midieron las variables altura (h) y diámetro a 1,30 m de altura (d) de los árboles en cada tratamiento para estimar el crecimiento en cada una de estas variables. Estas mediciones se realizaron a los 6 y 12 meses.

- b) Propiedades Químicas del suelo

Como primer paso se estableció una línea base de los nutrientes presentes en el suelo con base en un análisis químico realizado por la empresa previo al establecimiento de la plantación. Posteriormente en cada una de las etapas de medición, se realizó un muestreo de suelo en las 24 unidades experimentales. Cada muestra de suelo se recolectó con un barreno a dos profundidades (de 0 a 20 cm y de 20 a 40 cm) de acuerdo con la metodología propuesta por Ramírez (1990).

Las muestras se trasladaron al laboratorio del TEC y se secaron al aire por al menos 24 horas. Una vez secas al aire, se tamizaron a 2 mm, separando el suelo, la grava y la biomasa. Posteriormente se trasladaron al laboratorio del Centro de Investigaciones Agronómicas (CIA) de la Universidad de Costa Rica para la realización del análisis químico completo.

Con base en los análisis de suelo realizados y con relación al tema de acidez en el suelo, se evaluaron las variables pH, acidez (aluminio intercambiable), Porcentaje de Saturación de Acidez (SA%), Ca, Mg, K, Fe y Mn como los valores que podrían ser más sensibles para el cultivo de la melina.

La interpretación de los resultados del análisis de suelo para valorar las diferencias en los niveles de cada uno de los elementos presentes, se realizó según la tabla de interpretación de análisis de suelos de Molina y Meléndez (2002). Adicionalmente se utilizó la fórmula sugerido por Alvarado y Raigosa (2012) para el cálculo de la dosis del material encalante a utilizar.

Análisis estadístico

Los datos se analizaron mediante un Análisis de varianza (ANDEVA). Se analizaron los supuestos del ANDEVA mediante la prueba de Shapiro Wilks (normalidad) y la prueba de Levene para la homocedasticidad. Para determinar si existieron diferencias significativas entre los tratamientos se aplicó una prueba de Tukey ($p < 0,05$).

Generación de un protocolo automático para la interpretación de análisis de suelos.

Ante la falta de un método directo, confiable y de rápida ejecución para la interpretación de análisis de suelos, se desarrolló una hoja de excel que permite la interpretación automática de los resultados de análisis de suelos. Además, dentro de la misma hoja se generó un procedimiento para realizar el cálculo de la dosis encalante y la dosis de fertilizante (en caso de que sea necesario) para cualquier sitio de estudio.

Objetivo específico 3. Realizar el análisis financiero de la inversión en la mecanización y aplicación de enmiendas

Como primer paso se realizó un estudio de tiempos y movimientos para la obtención de costos y productividad, y de las labores de mecanización y aplicación de enmiendas. Adicionalmente se complementó la información con datos procedentes de la empresa MCC y de bases de datos recopiladas por FONAFIFO y GENFORES para generar los costos totales al año 1 de plantación.

Posteriormente se utilizó las ecuaciones de predicción del volumen y crecimiento realizadas por Quirós (2015) para determinar el diámetro y volumen al momento de corta. Para estimar el ingreso se utilizaron los precios de mercado para árboles en pie. No se consideró un aumento en los costos ni un aumento en el precio de la madera. Otros supuestos para la realización del análisis se muestran en el cuadro 2.

Como último paso, se calcularon los indicadores financieros y se determinó cuál de los tratamientos es el más rentable. Los indicadores utilizados fueron: (i) Valor actual neto (VAN), (ii) Tasa única de retorno (TUR), (iii) Relación beneficio costo, (iv) Valor esperado de la tierra (VET). No se utilizó la tasa interna de retorno debido a que la actividad evaluada no tiene un flujo convencional.

Cuadro 1. Supuestos utilizados para la construcción de flujos de caja de los distintos escenarios planteados

Variable	Valor
Unidad de producción	Hectáreas (ha)
Hectáreas del proyecto	1
Tipo de cambio	543,45
Costo de mano de obra por hora	1194,25
Costo de mano de obra más cargas sociales	1695,84
Densidad inicial de siembra	833
Precio madera en pie de melina	50 colones/pmt
Tasa de interés real	6%

Objetivo Específico 4. Monitorear actividades de preparación de sitio y establecimiento de plantaciones mediante el uso de vehículos aéreos no tripulados (UAVs).

Para lograr este objetivo se ejecutaron los siguientes pasos:

Escogencia del vehículo aéreo no tripulado a utilizar y selección de actividades silviculturales a monitorear

Con base en la literatura existente y entrevistas con profesionales forestales, profesores e investigadores expertos en Sistemas de Información Geográfica y sensores remotos se definió qué tipo de vehículo aéreo no tripulado es el mejor para monitorear operaciones en plantaciones forestales y cuáles son las actividades silviculturales relacionadas con el establecimiento de plantaciones que se pueden evaluar.

Generación de un flujo de trabajo para la obtención de los productos con base en las actividades seleccionadas

Con base en el punto “a”, se elaboró un flujo de trabajo para la realización de vuelos y obtención de orto mosaicos. Este protocolo incluyó aspectos como la altura de vuelo, traslape entre imágenes, condiciones atmosféricas favorables para la realización de vuelos, procesamiento de las imágenes, creación de un modelo de elevación el terreno y la generación de una orto foto. Todos los vuelos se realizaron en condiciones atmosféricas óptimas y se siguieron todos los protocolos establecidos por la Dirección General de Aviación Civil.

Validación del flujo de trabajo a través de un ejercicio práctico.

Con el propósito de validar los puntos anteriores, se realizó un análisis de caso de una plantación de melina de 4 meses de edad ubicada en Medio Queso, Los Chiles, provincia de Alajuela. A partir de las imágenes del RPAS se realizó un cálculo de áreas, un conteo de árboles y una estimación de alturas de los árboles. Los valores fueron comparados con los datos de una parcela permanente ubicada en el sitio. La comparación de las variables se realizó mediante una prueba T-student para comparación de medias.

Objetivo Específico 5. Transferir los conocimientos y las experiencias generadas a los grupos meta.

Para el cumplimiento de este objetivo se realizaron dos días de campo en donde se mostraron las principales actividades de silvicultura intensiva como preparación de sitio, encalado y fertilización. Adicionalmente se realizaron dos charlas sobre el uso de RPAS en plantaciones forestales

Como actividades de difusión se presentó el proyecto en congresos y seminarios del campo forestal a nivel nacional y se realizaron publicaciones divulgativas, técnicas y científicas sobre los principales resultados obtenidos dentro de la investigación.

RESULTADOS

Objetivo específico 1.

A pesar de que los valores de diámetro y altura para el tratamiento de mecanización 90 2P (1,8 y 209,4 cm respectivamente) fueron superiores al resto, no se encontraron diferencias significativas en el crecimiento a los 6 meses de edad (Cuadro 2).

Cuadro 2: Valores promedio y desviación estándar del diámetro y altura total en individuos de una plantación de 6 meses de edad, Zona Norte de Costa Rica.

Tratamiento	Diámetro (cm)	Altura (cm)
90 1p	1,1 ^a ± 0,4	173,6 ± 33,9
90 2p	1,8 ^a ± 0,4	209,4 ± 33,5
50 1p	1,3 ^a ± 0,6	173,3 ± 42,3
50 2p	1,1 ^a ± 0,4	174,2 ± 25,3

Propiedades físicas del suelo

La densidad aparente (da) del suelo evaluada a 2 profundidades previo al establecimiento del ensayo, no muestra diferencias significativas entre tratamientos para la profundidad de 0 a 20 centímetros.

Por otra parte, si se encontraron diferencias significativas para la profundidad de 20 a 40 cm de profundidad donde existieron diferencias entre los bloques 1 y 4, cabe destacar que los bloques 1 y 4 eran los más distantes entre sí.

Cuadro 3: Comparación entre promedios de densidad aparente correspondientes a junio 2019.

Tratamiento	Densidad aparente (g/cm³) Profundidad 0-20 cm	Coefficiente de variación (%)
90 cm 1 pasada	0,94 ^a	14,83
90 cm 2 pasadas	1,01 ^a	6,83
50 cm 1 pasada	0,96 ^a	10,57
50 cm 2 pasadas	1,07 ^a	28,00
Profundidad 0-20 cm		
90 cm 1 pasada	0,99 ^a	9,53
90 cm 2 pasadas	1,10 ^b	1,41
50 cm 1 pasada	1,03 ^{ab}	8,2
50 cm 2 pasadas	1,02 ^{ab}	11,42

Letras diferentes indican diferencias según Test de Fridman > 0,05

Para la segunda evaluación no se logró obtener muestras de densidad aparente que fueran representativas, ya que el efecto en la estructura que la mecanización provocó que el suelo no presentó la consistencia necesaria para tomar muestras con el método del cilindro, y los pocos terrenos presentes en el sitio no eran representativos del suelo disgregado post proceso de labranza. Esto podría llamar la atención ya que junto con observaciones de campo se notó que cuando la pendiente aumentaba a valores cercanos a 10 % se empezaba a causar erosión en zanjas a lo largo de la línea de plantación.

Los valores de resistencia a la penetración previo y posterior a la mecanización se pueden observar en el cuadro 4.

Cuadro 4: Valores promedio de resistencia a la penetración (MPa) cada 5 cm de profundidad, en un ensayo de labranza en profundidad, Zona Norte, Costa Rica.

Profundidad (cm)	Resistencia a la penetración previo a la mecanización (MPa)	Resistencia a la penetración posterior a la mecanización (MPa)
5	0,529	0,519
10	1,618	0,530
15	2,138	0,498
20	2,451	0,501
25	2,677	0,583
30	2,838	0,647
35	2,923	0,700
40	2,979	0,939
45	3,075	1,277
50	3,083	1,633
55	3,063	2,022
60	3,183	2,346
65	3,274	2,734
70	3,292	3,142
75	3,264	3,371
80	3,260	3,453

Luego de la aplicación de los tratamientos de labranza en profundidad se encontró un mejoramiento en los valores de resistencia a la penetración en comparación con los valores iniciales (antes de la mecanización). Anterior a la preparación del suelo, solo a los 5 y 10 cm. de profundidad se encontraron valores menores a los recomendados (2 MPa) para un adecuado crecimiento de las plantas. Por otra parte, los valores posteriores al proceso de preparación del suelo mejoraron ampliamente y solo se encuentran valores superiores a los 2 MPa luego de los 50 cm de profundidad.

No se encontraron diferencias entre tratamientos hasta los 12 cm de profundidad. A partir de esa profundidad y hasta los 69 cm se encontraron diferencias entre tratamientos; sin embargo, las mismas fueron inconsistentes y no permitieron con certeza determinar cuál tratamiento fue mejor.

Evaluación del proceso de mecanización

En el cuadro 5 se muestran las variables cualitativas evaluadas en este estudio. La variable presencia de rastrojo indica si las actividades previas a la labranza fueron realizadas adecuadamente, mientras que las variables encharcamiento y plasticidad son indicadores de la habilidad del operario para realizar la actividad y si las condiciones del suelo eran óptimas en el momento en que se realizó la operación.

Cuadro 5. Valores porcentuales y su respectivo error estándar para las variables cualitativas obtenidas

Variable evaluada	Valor porcentual
Presencia de rastrojo	15 ± 8.19
Encharcamientos	10 ± 6.88
Plasticidad	1 90
	2 10
	3 0

Del mismo modo el cuadro 6 presenta los valores promedio y su coeficiente de variación de las variables cuantitativas evaluadas.

Cuadro 6. Valores promedio y su coeficiente de variación para las variables cuantitativas evaluadas

Variable	Promedio	Coefficiente de Variación (%)
Profundidad efectiva (cm)	83.50	13.04
Ancho de trabajo (cm)	138.45	11.83
Distanciamiento entre mecanización (cm)	413.85	6.41

La profundidad efectiva presentó un valor promedio de 83,50 cm lo que demuestra que el proceso de profundización fue ejecutado correctamente. Del mismo modo, las otras variables evaluadas presentaron coeficientes de variación menores al 15%.

Objetivo específico 2

El cuadro 7 muestra los resultados del efecto de los distintos tratamientos en el crecimiento en diámetro y altura a los seis y doce meses de edad de la plantación.

Cuadro 7. Valores promedio y desviación estándar del diámetro y altura para los diferentes tratamientos de aplicación de cal en una plantación de *G. arborea*, Pocosol, San Carlos.

Tratamiento	Diámetro (cm)*		Altura (m)*	
	6 meses	12 meses	6 meses	12 meses
T1	3,55 ^a (0,48)	6,22 ^a (1,09)	2,63 ^a (0,34)	5,21 ^a (0,70)
T2	3,28 ^a (0,59)	6,18 ^a (0,78)	2,50 ^a (0,25)	5,02 ^a (0,63)
T3	3,36 ^a (0,72)	6,30 ^a (1,21)	2,59 ^a (0,42)	5,26 ^a (0,94)
T4	3,09 ^a (0,24)	6,05 ^a (0,31)	2,34 ^a (0,19)	4,98 ^a (0,33)

*Desviación estándar es el valor entre paréntesis

Letras diferentes indican diferencias según Test de Tukey > 0,05

Los resultados muestran que no existen diferencias significativas en el diámetro a los 6 meses (con valores entre los 3,09 y los 3,55 cm). A pesar de que a los 12 meses de edad los tratamientos de rodaja (T1) y el de banda fueron superiores tampoco se encontraron diferencias significativas ($p < 0,05$)

En cuanto a los valores de altura, para ambas mediciones el tratamiento de aplicación total de cal (T4) mostró los valores más bajos de altura en ambos períodos de medición con 2,34 m y 4,98 m, respectivamente. Sin embargo, tampoco se encontraron diferencias significativas entre los tratamientos ($p < 0,05$).

Con base en el cuadro 7 se calcularon los coeficientes de variación (CV) para ambas variables. Para ambos períodos de medición y para las dos variables evaluadas se obtuvo que los mayores valores de CV fueron para el tratamiento T3 y los menores valores de CV para el T4.

Cuadro 8. Coeficientes de variación para cada uno de los tratamientos empleados para evaluar el efecto de distintas formas de aplicación de enmienda en el crecimiento inicial de una plantación de *Gmelina arborea* (melina) recién establecida, Pocosol de San Carlos.

Tratamiento	Coeficiente de variación (%) del diámetro		Coeficiente de variación (%) de la altura	
	6 meses	12 meses	6 meses	12 meses
T1	13,43	17,52	13,06	13,36
T2	18,08	12,58	9,80	12,46
T3	21,52	19,16	16,26	17,79
T4	7,87	5,20	8,23	6,54

Propiedades químicas del suelo

Con la aplicación de los distintos tratamientos no se provocó un cambio en los valores de pH (cuadro 9). Este sitio en el momento de evaluación estaba entre muy fuertemente ácido a fuertemente ácido ya que los pH evaluados rondaron entre 4,8 y 5,1 durante el tiempo del proyecto.

Cuadro 9. Niveles de pH promedio a los 12 meses de aplicación de las enmiendas.

Tratamiento	Valor promedio de pH
T1 (25%)	5,03 ^a
T2 (33)%	5,04 ^a
T3 (50%)	5,03 ^a
T4 (100%)	4,96 ^a

Letras diferentes indican diferencias según Test de Tukey > 0,05

En relación a la acidez y el %SA existió un cambio entre los meses evaluados donde a los 12 meses de la aplicación del tratamiento se observó un nivel menor que a los 6 meses, este cambio se observa también con algunos elementos como Ca.

Cuadro 10. Niveles de acidez y %SA promedio en a los 6 y 12 meses posteriores a la aplicación de las enmiendas.

Meses desde la aplicación	Promedio de acidez	Promedio de SA%
6	0,53 ^b	10,04 ^b
12	0,32 ^a	5,33 ^a

Letras diferentes indican diferencias según Test de Tukey > 0,05

En relación con los otros elementos se observan algunos aspectos importantes, por ejemplo, en el caso del Ca, Mg y K existe un aumento en el tiempo, este puede estar relacionado con los aportes vía hojarasca o con la descomposición de la maleza y los residuos del aprovechamiento anterior.

Cuadro 11. Niveles de Ca, Mg y K promedio en a los seis y doce meses posteriores a la aplicación de las enmiendas.

Meses desde la aplicación	Ca (cmol+)/L	Mg (cmol+)/L	K (cmol+)/L
6	3,31 ^b	1,50 ^b	0,13 ^b
12	4,77 ^a	1,81 ^a	0,15 ^a

Letras diferentes indican diferencias según Test de Tukey > 0,05

Para el caso de los microelementos se observa una menor disponibilidad de Mn y una mayor de Fe.

Cuadro 12. Niveles de Fe y Mn promedio en a los 6 y 12 meses posteriores a la aplicación de las enmiendas.

Meses desde la aplicación	Fe (mg/L)	Mn (mg/L)
6	163,22 ^b	70,06 ^b
12	183,75 ^a	48,97 ^a

Letras diferentes indican diferencias según Test de Tukey > 0,05

Generación de un protocolo automático para la interpretación de análisis de suelos.

Como respuesta a una necesidad del sector forestal, se creó la *Hoja electrónica para la interpretación de análisis de suelos y cálculo de dosis de enmiendas y fertilizantes* (figura 5), la cual fue generada con el objetivo de proporcionar la información necesaria para la toma de decisiones en cuanto a la aplicación de enmiendas para solventar los problemas de acidez que puedan tener los suelos, así como la dosis de fertilizantes que se debe emplear en caso de que sean necesarios.

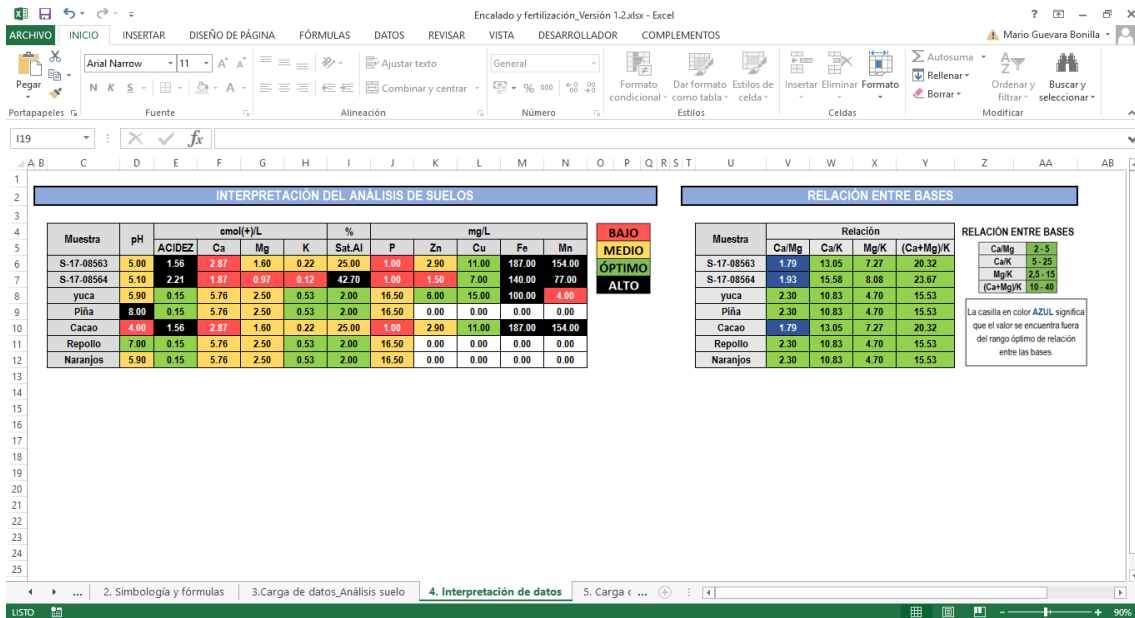


Figura 5. Vista interna de la cejilla de interpretación de los datos.

Entre las bondades de la hoja se encuentran: (i) su tamaño ya que solo pesa 0.5 megabytes, (ii) su facilidad de ser accesada en cualquier dispositivo electrónico (celular, computadora, tablet), (iii) posibilidad de analizar cinco análisis de suelos de manera simultánea. Esta hoja es de distribución gratuita y se ha compartido a personal técnico de organizaciones como la Oficina Nacional Forestal (ONF), FONAFIFO, CODEFORSA, FUNDECOR, entre otras (Anexo 15).

Objetivo específico 3

Con base en las labores analizadas en campo se determinó que la productividad promedio de aplicación (total) de cal de una persona por jornal (8 horas) es de 1 hectárea. Más del 70% del tiempo efectivo de la labor lo constituyó la actividad de “regado de cal” mientras que el tiempo restante se efectúa el traslado del material. Entre los movimientos improductivos se encontraron la alimentación y el descanso como los de mayor importancia. Para esta actividad se registraron muy pocos tiempos improductivos ya que contrario a lo que se esperaba, la actividad se desarrolla de una manera rápida.

Para el caso de la mecanización se determinó en conjunto con la empresa MCC que la productividad promedio de un tractor de oruga realizando el proceso de subsolado es de 2,5 hectáreas por jornada de trabajo. Es importante mencionar que la jornada de trabajo para este tipo de actividad es mayor que actividades que involucran mayor cantidad de personal y se puede prolongar hasta por 11 horas.

Para el cálculo de los costos se consideró que el precio por jornal, con sus respectivas cargas sociales, es de ₡16 120. En el cuadro 13 se observan los costos de aplicación de cal de los distintos tratamientos

Cuadro 13. Costo de aplicación del material encalante de acuerdo a cada uno de los tratamientos empleados en una plantación de *Gmelina arborea* (melina) recién establecida, Pocosol de San Carlos.

Tratamiento	CaCO ₃ (ton/ha)	Costo/ha (₡)*
T1 (25%)	0,250	4.030
T2 (33%)	0,375	6.045
T3 (50%)	0,500	8.060
T4 (100%)	1,000	16.120

*Costo operativo. No considera el costo del material encalante.

Por políticas internas de la empresa MCC no se pueden presentar los costos del proceso de labranza (subsulado). Sin embargo, sí se puede mencionar que el tratamiento de 50 cm, 1 pasada es el más económico seguido del tratamiento de 90 cm, 1 pasada. Para la obtención de costos de producción al año 1 (cuadro 14) se utilizó un costo de preparación del terreno de 150.000 colones que incluyen las actividades de subsulado (con arado de cincel) y 2 pasadas de rastra.

Cuadro 14. Costos de establecimiento y mantenimiento y diámetros promedio obtenidos al año 1 para distintos sistemas de producción de la especie *Gmelina arborea*.

Sistema de producción	Costo Año 1	Diámetro promedio año 1 (cm)
Tradicional	₡588.312	4
Tradicional + Mecanizado	₡738.312	4-5
Tradicional + Encalado	₡643.071	6
Intensivo	₡793.071	9

Costo de encalado consiste en 2 aplicaciones totales de 1 tonelada de carbonato de calcio por hectárea

Conforme se agregan actividades en la planificación silvicultural, los costos de producción aumentan hasta un 30%. Sin embargo, se puede notar que la

implementación de técnicas de silvicultura intensiva puede aumentar los valores de diámetro al año 1, de un 20 a un 50% en comparación con sistemas de producción tradicionales.

Los procesos de preparación de suelo, específicamente la labranza mecanizada es la actividad más cara por lo que una adecuada selección de maquinaria y una adecuada evaluación de su ejecución (como se discutirá más adelante) son fundamentales para la rentabilidad de un proyecto de reforestación, tanto a gran como a mediana o pequeña escala.

Análisis financiero

El cuadro 15 muestra los indicadores financieros calculados para distintos sistemas de producción de melina.

Cuadro 15. Indicadores financieros para los sistemas de producción evaluados.

Sistema de producción	Valor actual neto (VAN)	Tasa única de retorno (TUR)	Relación Beneficio costo(RBC)	Valor esperado de la tierra (VET)
Tradicional	52.437	4.66 %	1.22	287.735
Tradicional + mecanizado	-79.961	1.72 %	1.05	230.515
Tradicional + encalado	132.575	6.07 %	1.31	727.470
Intensivo	157.289	6.08 %	1.32	863.078

Escenarios creados sin PSA, sin aumento en los costos totales y sin aumento en el precio de la madera

Los sistemas de producción intensivos y utilizando cal (tradicional + encalado) presentaron mayores valores de VAN y porcentajes mayores de TIR que el sistema tradicional y el sistema tradicional más mecanización.

Objetivo específico 4

Selección del vehículo aéreo no tripulado y selección de actividades silviculturales a monitorear

En total se entrevistaron 6 personas con conocimiento y experiencia en el uso de RPAS. Todas las personas entrevistadas coincidieron que los siguientes elementos son básicos al momento de adquirir una aeronave pilotada a distancia:

1. Disponibilidad en el mercado.
2. Accesibilidad del precio para productores.
3. Portabilidad.
4. Tiempo de vuelo (duración de la batería).
5. Soporte técnico y facilidad de obtención de repuestos.

Con base en estos elementos se determinó que los RPAS de gama media son adecuados para el monitoreo de actividades de preparación de sitio y establecimiento de plantaciones forestales (figura 6). Entre sus principales características se encuentran: (i) precios entre los \$750 y \$2000, (ii) cámaras con resoluciones mínimas de 12 mega píxeles, (iii) tamaño y peso no superiores a los 400 mm y 1500 gramos (incluyendo la batería y propelas), (iv) resolución de video entre los 2,7 y 4K.

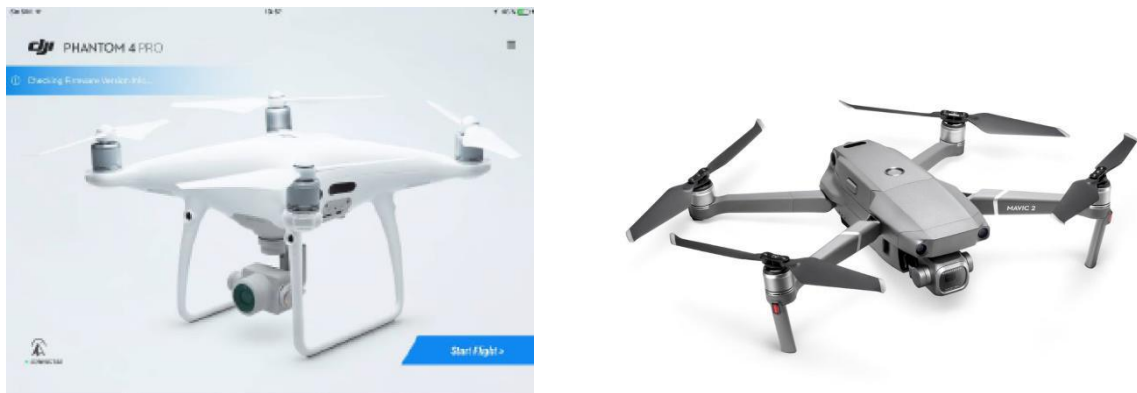


Figura 6. Ejemplo de dos vehículos aéreos no tripuladas de gama media y aptos para el monitoreo de actividades en plantaciones forestales.

Al ser este proyecto una primera fase, solo se contemplaron actividades que tuvieran relación con el proceso de mecanización inicial, establecimiento de la plantación, aplicación de enmiendas y crecimiento inicial de la plantación. Con base en las entrevistas realizadas en vuelos previos se seleccionaron las actividades silviculturales: (i) monitoreo de actividades de monitoreo y crecimiento de la plantación, (ii) cálculo de áreas de los lotes mecanizados (área efectiva), (iii) conteo de la totalidad de árboles por lote, (iv) mortalidad, (v) altura de los árboles.

Flujo de trabajo para las variables seleccionadas

Los resultados obtenidos de los vuelos que se llevaron a cabo en el marco de este proyecto permitieron comprobar que los RPAS pueden ser utilizados para hacer un monitoreo de las actividades de preparación de sitio y establecimiento de plantaciones.

Se lograron identificar 5 pasos fundamentales para el monitoreo de las distintas actividades.

- a) Calibración del VANT.
- b) Planificación y ejecución del vuelo La planificación del vuelo se debe realizar con base en las actividades que se quieran evaluar.
- c) Descarga y preprocesamiento de imágenes.
- d) Generación de la nube de puntos: se elabora la nube de puntos densa, la cual permite hacer una clasificación en donde se puede identificar la vegetación u otros elementos del espacio y por supuesto la superficie del suelo.
- e) Generación del modelo de elevación digital: Con base en la nube de puntos se construye un modelo de elevación del terreno y a partir del modelo de superficies se puede generar un modelo del terreno y se generarán las curvas de nivel del área fotografiada.
- f) Creación de la ortofoto: Como producto final se creará una ortofoto la cual permitirá hacer los cálculos de áreas, conteo de árboles y evaluación de la sanidad general de la plantación.

El flujo detallado se muestra en la figura 7

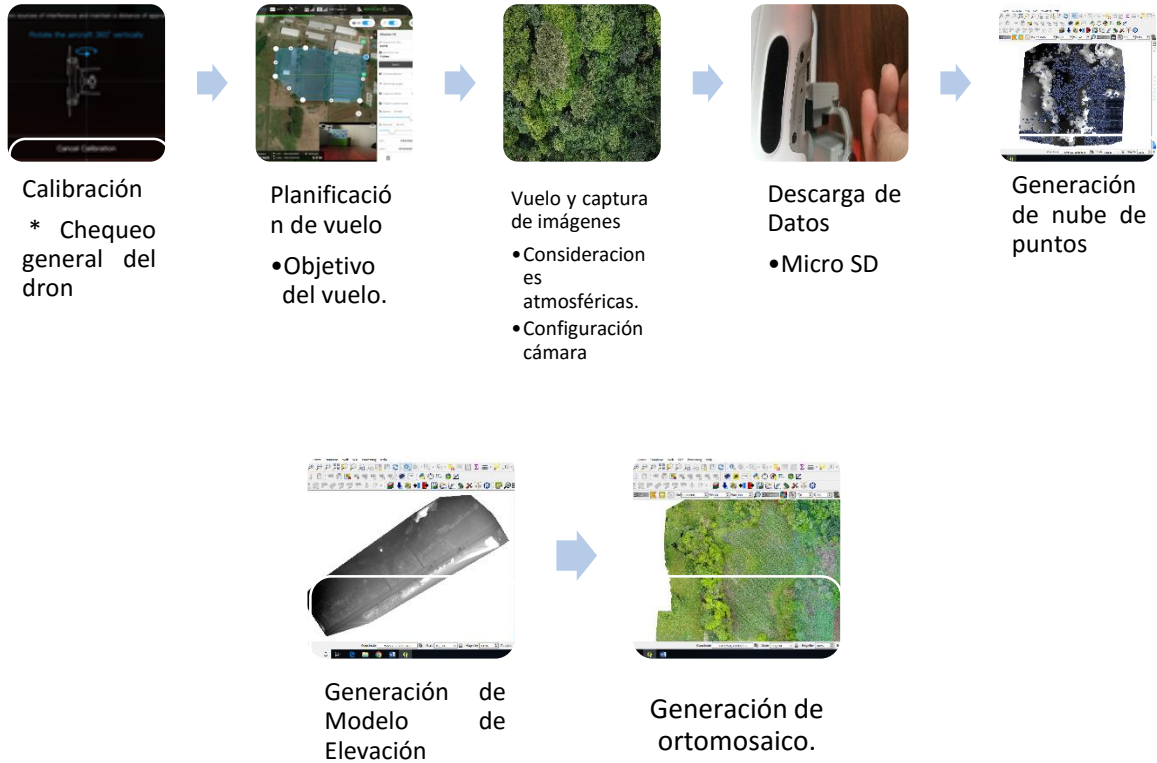


Figura 7. Flujo de trabajo construido para el vuelo y procesamiento de imágenes a partir de RPAS.

Validación del flujo de trabajo

Se seleccionó una plantación de melina de 4 meses de edad con gran facilidad de acceso y las condiciones atmosféricas fueron aptas para la realización del vuelo programado. Las especificaciones del vuelo programado se muestran en el cuadro 16.

Cuadro 16. Especificaciones de vuelo.

Variable seleccionada	Valores
Área evaluada	6 hectáreas
Modelo VANT	DJI Mavic pro
Altura de vuelo	65 metros
Traslape frontal	75%
Traslape lateral	60%
Ángulo de cámara	90°

El tiempo de vuelo del dron fue de 20 minutos por lo que se utilizó una sola batería. La altura de vuelo fue la mitad de la altura máxima de vuelo permitida (120 m) para Costa Rica. Con las especificaciones y la altura de vuelo seleccionadas se logró realizar un orto mosaico de gran calidad con una resolución de 2,81 cm/píxel (figura 8).



Figura 8. Orto foto de la plantación forestal donde se realizó la validación del protocolo.

Con base en la orto foto obtenida se calculó el área de una parcela, la altura y cantidad de los árboles dentro de la misma y se comparó con mediciones en campo (cuadro 17).

Las tres variables evaluadas presentaron valores muy similares a los obtenidos en las mediciones de campo. Para la medición de alturas se realizaron dos métodos: el conteo manual a partir de la ortofoto y mediante un algoritmo de cálculo.

Cuadro 17. Comparación de valores de campo y de valores obtenidos a partir de imágenes de un RPAS en una plantación de 4 meses de *Gmelina arborea*, Los Chiles, Costa Rica.

Método de muestreo	Variable	
	Número de árboles	Altura (m)
Parcelas	48 ^a	2.25
Vehículo aéreo no tripulado	49 ^a	2.31

Productos obtenidos de este objetivo

Los orto mosaicos que se construyeron, así como los Modelos de Elevación Digital que se obtuvieron en el análisis de la información, permitió la elaboración de una tesis de licenciatura y un manual completo respecto al uso de Aeronaves pilotadas a distancia para el monitoreo de actividades de preparación de sitio y establecimiento de plantaciones.

La tesis de licenciatura evaluó el uso de RPAS para el monitoreo de la nutrición de plantaciones forestales jóvenes.

El manual se divide en cinco partes:

1. Generalidades. Se detalla aspectos generales de VANTs.
2. Captura de información. Se detalla aspectos relacionados con la calibración, consideraciones antes de llevar a cabo un vuelo con VANT, especificaciones referentes a vuelos planificados y no planificados.
3. Descarga y preprocesamiento de imágenes. Se detalla sobre ambos procesos.
4. Procesamiento de imágenes. Se lleva a cabo una descripción de diferentes programas para poder obtener orto mosaicos y otros productos asociados al levantamiento de información de vuelos planificados.
5. Generación de productos avanzados en QGIS. Se explica varios procesos para obtener información referente a la ubicación de los árboles en una plantación forestal, obtener Modelos de Elevación Digital más precisos, estimación de alturas de árboles en una plantación forestal y estimación de índices de vegetación.

Este manual se encuentra disponible gratuitamente en internet y se compartió a través de las redes sociales de los investigadores y de la Escuela de Ingeniería Forestal. A la fecha se conoce que gracias a la difusión por redes sociales de la cuenta “Manejo de Suelos y Silvicultura intensiva TEC” se ha compartido el link al manual 393 veces.

Como segundo producto de este objetivo se elaboró el artículo de revisión titulado “Uso de vehículos aéreos no tripulados para el manejo y monitoreo de los recursos naturales: una síntesis” que será publicado en la edición de octubre de la Revista Tecnología en marcha (ver anexo12).

Objetivo específico 5

Los resultados de este capítulo se muestran en la sección transferencia y divulgación de resultados.

DISCUSIÓN

Para tener mejores condiciones físicas de suelo y disminuir los efectos de la compactación se han implementado actividades como la labranza o mecanización de suelo (Aruga, Hiyamizu, Nakahata y Saito, 2013). Las actividades de labranza inciden en cambios en la estructura y en la densidad aparente del suelo (Engler, Becker y Hoffmann, 2016), mejora la aeración, estimula el desarrollo radicular e inclusive en la disponibilidad de nutrientes (Bottinelli *et al.*, 2014).

La información presentada en el cuadro 4 demuestra que hay un mejoramiento en la resistencia a la penetración con la implementación de la labranza en profundidad (subsolado), independientemente de la profundidad a la que se haya realizado. Este mejoramiento de la resistencia a la penetración coincide con lo encontrado por Briceño *et al.*, (2016) en plantaciones de teca ya establecidas en la Zona Norte de Costa Rica. Las disminuciones de los valores de resistencia a la penetración pueden mejorar el área de acción de las raíces finas de un árbol, permitiendo la absorción de nutrientes disponibles de esta área previamente inaccesible.

Con una mejora en las condiciones físicas del suelo, se debe esperar un aumento en el crecimiento, que a su vez se debe reflejar en la mejora de variables como la altura, el diámetro y el consiguiente volumen total (González-Barrios *et al.*, 2015). Sin embargo, los resultados obtenidos (cuadro 2) no evidenciaron efectos de la labranza en el crecimiento diamétrico de los árboles y pudo ser debido a tres factores: (i) el crecimiento de la melina en sus fases iniciales se enfoca en el crecimiento apical, (ii) no se han evidenciado las mejoras en el crecimiento de los árboles por el poco tiempo transcurrido desde que se aplicó la mecanización (a pesar de las mejoras en la resistencia a la penetración) y (iii) la velocidad de la maquinaria y la ejecución del proceso de mecanización afectaron la calidad de los procesos de mecanización.

Uno de los aspectos importantes es que este ensayo se logró implementar en el campo hasta el segundo año de ejecución del proyecto por lo que los resultados mostrados solo incluyen una temporada de crecimiento correspondiente a la época lluviosa. Por el poco tiempo transcurrido desde la mecanización hasta el final del proyecto no se evidenciaron los efectos en el crecimiento de los árboles en la época seca. Se espera que los árboles puedan mostrar los efectos de la mecanización tanto en la época seca como al inicio de las lluvias, ya que al aumentar la aireación del suelo se aumenta el espacio poroso disminuyendo la densidad aparente y aumentando así la capacidad de retención de humedad. Esto favorecería a los árboles en los tratamientos de mayor profundidad.

En el sector forestal en Costa Rica no se encuentran referencias sobre los valores adecuados de resistencia a la penetración para el desarrollo óptimo de plantaciones forestales ni tampoco valores de profundidad de labranza adecuados para distintos tipos de suelo.

La metodología creada para la evaluación de procesos de mecanización pretende resolver este problema dando las primeras pautas para la recomendación de buenas prácticas de labranza y para mejorar los conocimientos en suelos y procesos de labranza entre los técnicos y profesionales forestales. Entre las principales ventajas de la metodología se encuentran: (i) su fácil aplicación en el campo, (ii) no demanda gran cantidad de tiempo, (iii) se puede modificar dependiendo del tipo de implemento utilizado para la preparación de suelo

Autores como Ladrach (2010) y Ugalde (2014) sugieren que la preparación ideal del suelo de una plantación comercial debe incluir un subsolado a una profundidad de al menos 50 cm. Por los altos valores de densidad aparente y de resistencia a la penetración encontrados en este estudio y en otras investigaciones realizadas por Arias *et al* (2016) en la región Huetar Norte, se sugiere utilizar la metodología creada y lo mencionado por los autores sea utilizado como línea en futuras prácticas de preparación de suelo por parte de pequeños y medianos reforestadores.

Efecto de distintas formas de aplicación de enmiendas en el crecimiento de los árboles

Para todos los tratamientos los valores de diámetro y altura para los 12 meses de edad son superiores a los valores mínimos de referencia (VMR) del FONAFIFO para el año 2020 y a valores reportados por ONG's en la zona. A pesar de los buenos valores de crecimiento, no se encontraron diferencias significativas en el crecimiento de los árboles entre las distintas formas de aplicación de cal. Esto coincide con lo reportado por Li *et al.* (2018) en su meta análisis donde indican que distintos tipos de aplicación de cal no son los factores principales que afectan el pH o la productividad de un determinado cultivo.

La corrección de los problemas de acidez, es un proceso que demora tiempo por lo que la realización de muestreo de suelos en el tiempo se convierte en una actividad fundamental para un mejor entendimiento de la fertilidad del suelo y su efecto en el crecimiento de los árboles.

Si se presentaron diferencias en los valores de coeficientes de variación para el diámetro y la altura de los distintos tratamientos. Lo anterior se traduce en una falta

de uniformidad en el crecimiento de los árboles dependiendo del tratamiento empleado. Estas variaciones podrían ser atribuidas a problemas de manejo como el control de malezas o directamente a problemas o diferencias en la calidad del material y en la forma de aplicación por parte de los trabajadores.

Efecto de la aplicación de enmiendas en las propiedades del suelo

Se encontró una mejora de los 6 a los 12 meses en los niveles de acidez, Ca, Mg y %SA, esto podría estar relacionado a deficiencias en control de malezas, a la descomposición de hojarasca y residuos de cosecha, a que al aplicar el material encalante húmedo este podría haber requerido más tiempo para su reacción con el suelo.

Por otra parte podría esperarse que el desarrollo radical demorara más de 7 meses en colonizar toda la superficie, haciendo una relación con el cierre de copas, por lo que la posibilidad de que con el crecimiento a extraer bases del suelo se minimizó, por otro lado las condiciones climáticas que provocan acidez como la lluvia o las tormentas eléctricas que se dan en la zona pareciera no afectar tanto en este sitio, pues hemos evidenciado lugares donde la necesidad de incorporar materiales encalantes llegan a ser hasta 9 veces mayor que la de este sitio razón por la cual podría verse minimizados los efectos de los tratamientos al no ser el factor más limitante del crecimiento.

En los sitios más ácidos donde las condiciones naturales podrían provocar acidez de nuevo en el suelo y los efectos del encalado prevalecer poco tiempo se ha recomendado el fraccionamiento de las dosis tal y como se ha realizado en las parcelas demostrativas que se están implementando por el Programa de Silvicultura Intensiva donde se ha planteado el fraccionamiento de las dosis de enmiendas y la aplicación repetitiva en el año de al menos 3 veces con el fin de poder adecuar cada vez más la aplicación al desarrollo de la plantación.

Definitivamente para poder demostrar los efectos de una aplicación diferenciada y adaptada a la edad del cultivo es necesario realizar un estudio en un lugar con mayores necesidades de la aplicación de enmiendas, en algunos de los suelos evaluados se han determinado necesidades superiores a las 8 toneladas de carbonato de calcio por hectárea para contrarrestar la acidez del sitio. Será necesario también un adecuado control de malezas de manera tal que no compitan con el cultivo, pero que a la vez exista una cobertura del suelo para evitar la erosión.

Evaluar la nutrición de las especies forestales también sería un tópico a tratar en futuras investigaciones, ya que al mejorar las condiciones de acidez mejorará la nutrición. Y no solo desde el punto de vista de los contenidos foliares de nutrición sino también del mejoramiento de los suelos y de la retranslocación de nutrientes y el reciclaje de los mismos a lo largo de la plantación, lo que implica al menos una investigación que dure un ciclo productivo, que en el caso de melina es de al menos 6 años y en el caso de teca de al menos 15 años

Costos y análisis financiero de la implementación de procesos de labranza y aplicaciones de enmiendas al suelo.

Entre las principales implicaciones para el manejo de los resultados obtenidos se encuentra que, al no existir diferencias entre los tratamientos, los productores pueden tener la libertad de escoger el método que les sea de menor costo y el que tenga menos dificultades de establecer en el campo. La selección de tratamientos más económicos, aplicación de materiales encalantes o formas de mecanización diferentes a las evaluadas y la búsqueda de formas más eficientes en la aplicación de los mismos puede traer beneficios al sector reforestador.

La aplicación de técnicas de silvicultura intensiva puede mejorar la rentabilidad de un proyecto forestal al aumentar la productividad de los árboles y reducir los turnos de cosecha. Sistemas productivos que apliquen cal o sistemas productivos intensivos que apliquen procesos de labranza y aplicaciones de cal pueden tener rentabilidades similares a la ganadería de carne en suelos marginales sin la necesidad de optar por el Pago por Servicios Ambientales (PSA). Por ejemplo, el VAN del sistema intensivo correspondió a ¢157.289 por hectárea y calculado anualmente corresponde a ¢26.214 por hectárea. Mientras que el ingreso neto anual por la ganadería de carne con desarrollo de siete meses (210 días) con 0,8 cabezas por hectárea da como resultado ¢31.502 por hectárea según información que maneja la Oficina Nacional Forestal.

La combinación con cultivos en los primeros años y la creación de nuevos modelos para la producción de madera en turnos cortos deben ser temas a tratar en futuras investigaciones con el fin de aumentar la rentabilidad de proyectos forestales a pequeña y mediana escala.

Uso de aeronaves no tripuladas para el monitoreo de actividades de establecimiento y manejo inicial de plantaciones forestales

Los resultados encontrados demostraron que los RPAS pueden ser utilizados para hacer sobrevuelos de áreas extensas en poco tiempo, programar vuelos en áreas específicas y repetirlos con facilidad, llevar a cabo un monitoreo de actividades silviculturales y de esa manera proveer información relevante para la toma de decisiones. Estas ventajas concuerdan con las ventajas encontradas por autores como Banu *et al.*, (2016) y Padua *et al.*, (2017) para actividades en bosques, plantaciones y sistemas agroforestales

La restricción en cuanto a altura máxima, la falta de señal celular y la dificultad para encontrar programas de procesamiento de imágenes gratuitos o de bajo costo y de alta calidad fueron las principales limitantes encontradas en este estudio. Esto coincide con lo expuesto por (Méndez, Vélez, Scaramuzza, & Villaroel, 2015), (Arriola-Valverde, Ferenz-Appel, & Rimolo-Donadio, 2018) en cuanto a las limitaciones, este tipo de tecnología presenta poca cobertura, podría mostrar restricciones de operación debido a las regulaciones de cada país, es sensible a las condiciones ambientales adversas y muestra dificultad para reconstruir o procesar imágenes de áreas muy homogéneas Padua *et al.* (2017). Adicionalmente los pilotos deben estar capacitados para hacer que el equipo vuele de la mejor manera y existen limitaciones en cuanto al equipo de cómputo requerido para el procesamiento adecuado de las imágenes capturadas.

Baltsavias *et al.* y Dandois y Ellis (2015) mencionan que imágenes a baja altura pueden ser utilizadas sistemáticamente para determinar la altura de un rodal. Otros autores como Guerra-Hernández *et al.* (2016), Birdal *et al.* (2017) y Panagiotidis *et al.* (2017) han utilizado RPAS para la estimación de variables como alturas y forma de copa de árboles, a través de diferentes métodos de captura, algoritmos y procesamiento de información con resultados positivos, tal como lo evidenció la correspondencia efectiva de la estimación de alturas de árboles con el RPAS y las parcelas de medición en este estudio.

El proceso para la estimación de los valores de altura y los valores encontrados resultados son satisfactorios, sin embargo, debe crearse protocolos más específicos para la determinación de las alturas y porcentajes de traslape idóneos de acuerdo a la especie, edad de plantación y topografía del sitio. Para futuros estudios deben crearse herramientas prácticas y de libre acceso que permitan obtener modelos de elevación digital y modelos de elevación de superficie para, posteriormente, el cálculo automático de variables dasométricas como diámetro de copa, altura y diámetro.

TRANSFERENCIA Y DIVULGACIÓN DE RESULTADOS

Esta sección presenta los resultados del objetivo específico cinco. Como se mencionó con anterioridad en los informes de avance del proyecto, se decidió ampliar las actividades propuestas (un taller demostrativo) a una cantidad mayor para así abarcar todo el público meta propuesto.

El proyecto concentró buena parte de las actividades en la proyección de resultados a nivel nacional. Algunos resultados se presentaron en jornadas de investigación, conferencias internacionales, talleres, días de campo dirigidos a profesionales y productores forestales (Cuadro 19). Adicionalmente se realizaron dos publicaciones científicas y un manual técnico que abarcaron todos los objetivos propuestos

Cuadro 19. Actividades de transferencia y divulgación realizadas durante el período de ejecución del proyecto

Actividad	Fecha
Taller con funcionarios del FONAFIFO sobre los usos de vehículos aéreos no tripulados para el monitoreo y análisis de labores forestales	Mayo 2018
Taller con funcionarios de ASIREA uso de drones para la silvicultura	28 de mayo del 2018
I Día de campo Silvicultura Intensiva y de Precisión, Pital, San Carlos	24 de octubre del 2018
Participación en el VIII Encuentro de Investigación y Extensión.	7 de diciembre del 2018
II Día de campo Avances en silvicultura intensiva, plantaciones energéticas y modelo de producción de tarimas	20 de Junio del 2019
Participación en programa Radial Vida Agropecuaria Tema: Técnicas de Silvicultura intensiva para el aumento de la productividad y calidad de plantaciones forestales en la Región Huetar Norte	23 de mayo del 2019
Participación con ponencia en el VII encuentro de finanzas rurales	20 al 22 de agosto del 2019
Participación como capacitadores en el Plan de Formación de los actores del Cluster Forestal de la Región Huetar Norte. Sesión 7. Técnicas de silvicultura intensiva para el aumento de la productividad y rentabilidad de plantaciones forestales.	14 de noviembre del 2019
Ponencia Presentación de resultados. I jornada de presentación de resultados proyectos de investigación y extensión, Escuela de Ingeniería Forestal	Noviembre del 2019

Adicionalmente a las actividades de transferencia se realizaron dos publicaciones científicas, un manual técnico, dos publicaciones informativas y un software con su respectivo manual de uso que abarcaron todos los objetivos propuestos.

Cuadro 20. Lista de publicaciones realizadas bajo el marco del proyecto

Publicación	Tipo de publicación	Revista
Guevara M., Esquivel E., Garro M. 2018. Silvicultura de precisión por medio de VANTs, como herramienta para el monitoreo y aumento de la productividad de plantaciones forestales. Revista Germinar. Costa Rica. Octubre (25), 6-7.	Publicación divulgativa	Revista Germinar
Esquivel E., Guevara M. 2019. Encalado: una opción para el mejoramiento de la productividad forestal. Revista Germinar. Costa Rica. Julio (26), 15-16.	Publicación divulgativa	Revista Germinar
Uso de vehículos aéreos no tripulados (VANT's) para el monitoreo de recursos naturales: una síntesis	Publicación científica	Revista Tecnología en marcha (Indexada en Scielo)
Metodología para la evaluación de la calidad física de procesos de mecanización de suelos en plantaciones forestales	Publicación científica	Revista Colombia forestal (Indexada en Scopus)
Procesamiento de imágenes a partir de vehículos aéreos no tripulados utilizando software libre	Publicación técnica	Redes sociales Grupo Silvicultura Intensiva TEC

Es importante resaltar que producto de la organización de los días de campo en silvicultura intensiva surgen los primeros contactos con productores forestales interesados en implementar varias de las técnicas puestas en práctica durante este proyecto. Además, el grupo GENFORES mostró interés en evaluar el efecto del encalado y mecanización en el crecimiento de clones específicos. Es a partir de esas primeras conversaciones que para el año 2020 se ha iniciado con la segunda fase de investigación que se denomina “Técnicas de silvicultura intensiva para el aumento de la productividad de plantaciones clonales de teca y melina”.

CONCLUSIONES

1. Existió un mejoramiento en la resistencia a la penetración con la implementación de la labranza en profundidad (subsolado), independientemente de la profundidad a la que se haya realizado. No se encontraron diferencias entre los distintos tratamientos evaluados en las variables de diámetro y altura
2. No se encontraron diferencias entre los distintos tratamientos de aplicación de cal y su efecto en el crecimiento en diámetro y altura en una plantación de melina a los 6 y 12 meses de edad.
3. Se encontraron diferencias 12 meses después de la aplicación de la cal en algunas propiedades químicas del suelo con respecto a la evaluación de los 6 meses. Algunas variables como el porcentaje de saturación de acidez y el calcio presentaron mejores niveles.
4. Los costos de utilizar maquinaria pesada para realizar procesos de mecanización son elevados. Los tratamientos que realizan dos pasadas de subsolador son mucho más caros que realizar el proceso de labranza una sola vez. Encalar solo la rodaja de los árboles es más barato que realizar una aplicación en banda o total. El alto costo de los procesos de mecanización hace que financieramente no sea rentable, sin embargo, si se realiza un manejo intensivo que combine mecanización y encalado pueden generar mayores crecimientos y convertir la reforestación en una actividad atractiva.
5. Los RPAS más recomendados para realizar labores de monitoreo de actividades de establecimiento y manejo inicial de plantaciones son los drones de gama media por su precio, portabilidad y versatilidad de funciones.
6. Se comprobó la viabilidad de realizar el monitoreo de actividades como cálculo de áreas, conteo de árboles, mortalidad y altura de árboles mediante la utilización de aeronaves pilotadas a distancia.
7. Se logró transferir el conocimiento de técnicas de silvicultura intensiva y de uso de RPAS a los grupos meta a través de días de campo y de talleres demostrativos.

RECOMENDACIONES

1. Repetir el ensayo de encalado en más zonas del país, especialmente en sitios con mayores problemas de acidez.
2. Replicar los ensayos implementados en este proyecto en zonas con déficit hídrico y en otras especies de gran interés como teca.
3. Evaluar el uso de técnicas de silvicultura intensiva en clones específicos para determinar el efecto sobre ellos y poder tener una silvicultura mejor adaptada a los distintos sitios del país y así llegar a una silvicultura clonal.
4. Desarrollar una investigación que genere protocolos de vuelo y obtención de productos a partir de RPAS de acuerdo a la especie, topografía del sitio y edad

REFERENCIAS

- Adekunle VAJ, Alo AA, Adekayode FO. Yields and nutrient pools in soils cultivated with *Tectona grandis* and *Gmelina arborea* in Nigerian rainforest ecosystem. *Journal of the Saudi Society of Agricultural Sciences* (2011) 10:127-135.
- Alvarado, A., Raigosa, J. (2012). Nutrición y fertilización forestal em regiones tropicales. Editorial San José, Asociación Costarricense de la Ciencia del Suelo, CR. 416 p.
- Arias, D., Arguedas, M., Briceño, E., Canessa, R., Chavarría, A., Esquivel, E., Guevara, Mario. (2016). Mejoramiento tecnológico de suelos para el incremento de la productividad en plantaciones de *Tectona grandis*. Informe final de proyecto de investigación. Instituto Tecnológico de Costa Rica. 86 p.
- Arriola, S., Villagra, K., Méndez-Morales, M., Gómez, N., Milton, S.-Q., & Rímolo-Donadío, R. (2019). Desarrollo y validación de una metodología para la cuantificación de la erosión hídrica a través de fotogrametría UAS. *Tecnología en Marcha*, 32, 43-52.
- Aruga, K., Hiyamizu, G., Nakahata, C. y Saito, M. (2013). Effects of aggregating forests, establishing forest road networks, and mechanization on operational efficiency and costs in a mountainous region in Japan. *Journal of Forestry Research*, 24(4), 747-754. doi:10.1007/s11676-013-0414-1.
- Banu, T., Borlea, G., & Banu, C. (2016). The use of drones in Forestry. *Journal of Environmental Science and Engineering*, 557-562.
- Birdal, A., Avdan, U., Türk, T. (2017). Estimating tree heights with images from an unmanned aerial vehicle. *Geomatics, Natural Hazards and Risk*. 8, 1144-1156. doi: 10.1080/19475705.2017.1300608.
- Bottinelli, N., Hallaire, V., Goutal, N., Bonnaud, P. y Ranger, J. (2014). Impact of heavy traffic on soil macroporosity of two silty forest soils: Initial effect and short-term recovery. *Geoderma*, 217, 10-17. doi:10.1016/j.geoderma.2013.10.025
- Briceño, E., Arias, D., Guevara, M., Esquivel, E., Arguedas, M., Canessa, R. (2016). Effects of High Intensity Tillage Applications to Improve Productivity on Established Teak (*Tectona Grandis*) Plantations in Specific Site Conditions in Northern Costa Rica. *Journal of Agriculture and Life Sciences*. Vol. 3, No. 2; December, 2375-4214.

- Dandois, J.P., Ellis, E.C. (2015). High spatial resolution three heights with images from an unmanned aerial vehicle. *Geomat Natural Hazards Risk*. 1-13
- Dick, B. (2003). The path to increase profitability!. In: *PROCEEDINGS OF THE SECOND INTERNATIONAL PRECISION FORESTRY SYMPOSIUM*. 2003.. University of Washington. Coll. of For. Resour. Seattle. Washington. p. 3-8.
- Chianucci, F., Puletti., N., Giacomello., E., Cutini., A. y Corona, P. (2015). Estimation of leaf area index in isolated trees with digital photography and its application to urban forestry. *Urban Forestry & Urban Greening*, 14(2), 377-382. doi:10.1016/j.ufug.2015.04.001
- Fernández-Moya, J. y Alvarado, A. (2014). Forest nutrition and fertilization in teak (*Tectona grandis* Lf) plantations in Central America. *New Zealand Journal of Science*, 44, 1-8. doi:10.1186/1179-5395-44-S1-S6
- González-Barrios, P., Pérez-Bidegain, M, & Gutiérrez, L. (2015). Effects of tillage intensities on spatial soil variability and site-specific management in early growth of *Eucalyptus grandis*. *Forest Ecology and Management*, 346, 41-50.
- Guerra-Hernández, J., González-Ferreiro, E., Sarmiento, A., Silva, J., Nunes, A., Correia, A., Fontes, L., Tomé, M., Díaz-Varela, R. (2016). Using high resolution UAV imagery to estimate tree variables in *Pinus pinea* plantation in Portugal. *Forest Systems*, 5, 2. doi:10.5424/fs/2016252-08895.
- JOKELA, et al. (2010). Twenty-Five years of intensive forest management with southern pines: Important lessons learned. *Journal of Forestry*. SAF. US: p. 338-347.
- Khanduri, V., Lalnundanga, L. y Vanlalremkimi, J. (2008). Growing stock variation in different teak (*Tectona grandis*) forest stands of Mizoram, India. *Journal of Forestry Research*, 19(3), 204-208. doi:10.1007/s11676-008-0043-2
- Mead DJ. Opportunities for improving plantation productivity. How much? How quickly? How realistic? *Biomass & Bioenergy* (2005) 28:249-266.
- Méndez, A., Vélez, J., Scaramuzza, F., & Villaroel, D. (2015). Los drones como herramienta para el monitoreo de cultivos. *Revista de la bolsa de comercio de Rosario*. 6-10.
- Mougin, E., Demarez, F., Diawara, M., Hiernaux, P., Soumaguel, N. y Berg, A. (2014). Estimation of LAI, fAPAR and fCover of Sahel rangelands (Gourma, Mali). *Agricultural and Forest Meteorology* 198, 155-167. doi:10.1016/j.agrformet.2014.08.006.
- Pádua, L., Vanko, J., Hruska, J., Adao, T., JJ, S., Peres, E., & Morais, R. (2017). UAS, sensors and data processing in agroforestry: a review towards practical applications. *International Journal of Remote Sensing*(38), 2349-2392.

- Panagiotidis, D., Abdollahenejad, A., Surovy, P., Chiteculo, V. (2016). Determining tree height and crown diameter from high-resolution UAV imagery. *International Journal of Remote Sensing*, 38,8-10, 2392-2410. Doi: 10.1080/01431161.2016.1264028
- Onyekwelu JC, Mosandl R, Stimm B. Productivity, site evaluation and state of nutrition of *Gmelina arborea* plantations in Oluwa and Omo forest reserves, Nigeria. *For. Ecol. Manage.* (2006) 229:214-227.
- Ugalde, A.L. 2013. Teak: New trends in silviculture commercialization and Wood utilization. Ed 1. Cartago Costa Rica. *International Forestry and Agroforestry (INFOA)*. 568 p.
- Vyas, D., Mehta, N., Dinakaran, N. y Krishnayya, K. (2010). Allometric equations for estimating leaf area index (LAI) of two important tropical species (*Tectona grandis* and *Dendrocalamus strictus*). *Journal of Forestry Research*, 21(2), 197-200. doi:10.1007/s11676-010-0032-0
- Yoshifuji, N., Kumagai, T., Tanaka, K., Tanaka, N., Komatsu, H., Suzuki, M. y Tantasirin, C. (2009). Inter-annual variation in growing season length of a tropical seasonal forest in northern Thailand. *Forest Ecology and Management*, 229, 333-339. doi:10.1016/j.foreco.2006.04.013
- Zhang, W., Yu, D., Shi, X., Wang, H., Gu, Z., Zhang, X. y Tan, M. (2011). The suitability of using leaf area index to quantify soil loss under vegetation cover. *Journal of Mountain Science*, 8(4), 564-570. doi:10.1007/s11629-011-1121-z

ANEXOS

Anexo 1: Formulario empleado para la evaluación de los procesos físicos de mecanización en plantaciones forestales.

Hoja No. ____

Propietario: _____ Ubicación geográfica _____

Ubicación de finca _____ Especie a plantar _____ Fecha de mecanización _____

Fecha de medición _____ Anotador _____ Lote _____ Textura al tacto: _____

Área mecanizada (m²) _____ Velocidad promedio de maquinaria _____

Observación	Profundidad efectiva de labranza* (cm)	Presencia de rastrojo 1 o 2	Resistencia a la penetración	Encharcamientos 1 o 2	Plasticidad	Ancho de trabajo (cm)	Distanciamiento Entre mecanización (cm)
					1 2 3		
1							
2							
3							
4							
5							
6							
7							
8							
9							
10							
11							
12							
13							
14							
15							

*No corresponde a la dimensión del implem

Anexo 2. Registro de la presentación de informes de avance ante la Dirección de Proyectos.

Dirección de Proyectos
Tel.: 2550-2315 / 2550-2300

DIP-230-2020

Memorando

Para: MSc. Mario Guevara Bonilla, Coordinador
Escuela de Ingeniería Forestal

De: MSc. Maribel Jiménez Montero, Gestora
Dirección de Proyectos
Instituto Tecnológico de Costa Rica

Firma digital por: MARIBEL JIMÉNEZ MONTERO (PRIMA)
Fecha: 2020.06.01 15:01:10 -06:00
Razón: Estoy certificado
Localización: Tecnológico de Costa Rica

Fecha: 1 de junio de 2020

Asunto: Informe parciales entregados

A su solicitud, se indica el detalle de las fechas de recepción en la Dirección de Proyectos, de los informes parciales correspondientes al proyecto "Desarrollo de un programa de silvicultura intensiva y de precisión para el aumento de la productividad de plantaciones forestales. Fase I: preparación de sitio y aplicación de enmiendas en plantaciones recién establecidas" 1401079, coordinado por usted.

- Primer Informe: 26 de junio de 2018
- Segundo informe: 10 de diciembre de 2019
- Tercer Informe: 25 de junio de 2019
- Informe final: pendiente

mjm

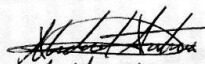
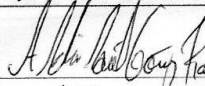

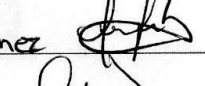

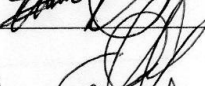

c.c.: Archivo

Anexo 3. Lista de asistencia charla sobre los usos de vehículos aéreos no tripulados para el monitoreo y análisis de labores forestales

Charla: Vehículo aéreos no tripulados para el monitoreo y análisis de labores forestales

Lugar: FONAFIFO

Mayo 2018

Nombre	Firma	Correo electrónico
Michael Antonio Porras Jiménez		mporras@fonafifo.go.cr
Aldrin Saul Gómez Bonilla		agameca@fonafifo.go.cr
Alex M Colvo Gongora		acolvo@fonafifo.go.cr
Jennifer Hernández Sánchez		jennifer.hernandez@fonafifo.go.cr
Cristian Díaz Q		cdiaz@fonafifo.go.cr
Jonathan Sánchez		jonsanchez@fonafifo.go.cr
Gilmar Navarrete		gnavarrete@fonafifo.go.cr

Anexo 4. Lista de asistencia charla con funcionarios de ASIREA uso de drones para la silvicultura

Lista asistencia

28 de mayo de 2018.

Lugar: Oficina de ASIREA

Tema: Uso de drones para la silvicultura.

Nombre	Contacto
Viviana Miranda D	v.miranda@asirea.org
Patricia Barrantes	pbarrantes@asirea.org
Jane Segleau Caule	jane.segleau@asirea.org
Roberto Javier Salas Quevedo	robertosalas@asirea.org
IRISIAN BITAREAU	Tristan.bitaureau@audencia.com
Clement Humbert	Clement.humbert@audencia.com
Louis Lebault	Louis.lebault@audencia.com

Anexo 5. Lista de asistencia primer día de campo silvicultura intensiva y de precisión, Pital, San Carlos.




24 de Octubre del 2018

**I DÍA DE CAMPO
SILVICULTURA INTENSIVA Y DE PRECISIÓN
PITAL, SAN CARLOS**

LISTA DE PARTICIPANTES

	Nombre	Firma
1	Alirán Alfonso Rivera Gómez	
2	Luis Edo Pérez Obando	
3	Gilberth Solano Scañellaz	
4	Carlos Aníbal Arias	
5	Arturo Ballesteros Vargas	
6	Alejandro Meza Montoya	
7	José Ramón Ortiz Peña	
8	Stewart Gómez Parra	
9	Georgina Solís Rojas	
10	Mario Enrique Arce Sandoval	
11	Mauricio Soto Maya	
12	Michael Gomo Charanía	
13	Verónica Vilclosos Baquero	
14	Randall Herrera González	
15	Carlos Méndez Rojas	
16	CARLOS PORRAS SALAZAR	
17		
18		
19		
20		
21		
22		
23		
24		
25		

Anexo 6. Poster Desarrollo de un programa de silvicultura intensiva y de precisión para el aumento de la productividad en plantaciones forestales. VII Encuentro de Investigación y extensión



Desarrollo de un programa de silvicultura intensiva y de precisión para el aumento de la productividad en plantaciones forestales

Mario Guevara-Bonilla, Edwin Espinosa-Segura, Rosalva Concha-Mora, Federico Masís, Andrea Tapia
Escuela de Ingeniería Forestal
2018-022

Introducción


El cultivo de árboles con fines productivos es imprescindible para el cumplimiento de las metas establecidas en el Plan Nacional Forestal de Desarrollo (PNFD) 2011-2020, la Estrategia REDD+, la mitigación del cambio climático y la contribución a la sostenibilidad del país. Además el Fondo Nacional de Financiamiento Forestal (FONAFIFO) ha establecido rendimientos mínimos para poder obtener los desembolsos totales de los proyectos que actualmente tienen pago por servicios ambientales (PSA).

De acuerdo con estadísticas de la Oficina Nacional Forestal (2016) la tasa anual de reforestación en el país ha disminuido considerablemente. Entre las causas de la disminución de la reforestación en Costa Rica se mencionan problemas de financiamiento, problemas de mercado principalmente la baja productividad de las plantaciones debido a la escasez de sitios con serias limitaciones físicas (compaction) y químicas (alta permeabilidad de saturación de ácidos) y el desconocimiento de técnicas correctas y eficientes de preparación de sitios y manejo nutricional de las plantaciones (falta de paquetes tecnológicos adecuados).

Con la finalidad de revertir esta situación esta propuesta de investigación pretende desarrollar un programa de silvicultura intensiva y de precisión para aumentar la productividad de plantaciones forestales. Este nuevo concepto pretende planificar y ejecutar actividades sitio específicas que busquen aumentar la productividad, reducir costos, aumentar ganancias y ser sostenibles con el ambiente.

Metodología

Este programa abarca tres fases donde la primera etapa (2018-2019) tiene que ver con el establecimiento de plantaciones, la segunda con el manejo de la fertilidad y una tercera que evaluará como estas cosas la aplicación de técnicas de silvicultura de precisión.



Especies seleccionadas: *Cratogeomys arbores*

Diseño experimental: Bloques completos al azar. Se evaluará el efecto de la mecanización inicial y de la aplicación de emendas (cal) en el mejoramiento de las propiedades físicas del suelo y en el aumento del crecimiento inicial de las plantaciones.

Aspectos a evaluar: Propiedades físicas y químicas del suelo. Diámetro, altura, área foliar. Análisis financiero de actividades de mecanización y encañado en plantaciones forestales. Uso de vehículos aéreos no tripulados para el monitoreo y aumento de la productividad de plantaciones forestales.

Se cuenta con una finca demostrativa donde se muestran las mejores técnicas de silvicultura intensiva.

Resultados y Discusión

En la finca demostrativa se ha encontrado un efecto de la aplicación de emendas en el mejoramiento de los problemas de ácidos y en el crecimiento inicial de árboles de *Cratogeomys arbores*.

Cuadro 1. Interpretación del análisis químico del suelo de la finca demostrativa 6 meses posterior al encañado, Pital de San Carlos, 2018


Parámetro	Unidad	Valor	Referencia
pH		5.2	5.5 - 6.5
Ca	mg/kg	120	100 - 200
Mg	mg/kg	80	50 - 150
K	mg/kg	150	100 - 300
N	mg/kg	100	50 - 200
P	mg/kg	50	20 - 100
S	mg/kg	200	100 - 400
C	mg/kg	1000	500 - 2000
C/N		10	10 - 20

La aplicación de técnicas de silvicultura intensiva y de precisión han generado un crecimiento inicial de las plantaciones satisfactorio. En el cuadro 2 se muestra el crecimiento inicial de la plantación.

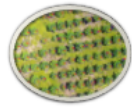

Cuadro 2. Valores promedio de diámetro a los 5 meses de edad de una plantación de melina con y sin cal previo al establecimiento, Pital de San Carlos, 2018.

Sitio	Diámetro (cm)	Altura (m)
Silvicultura intensiva	3.0	3.0
Silvicultura tradicional	1.7	1.8

Productos realizados



Hoja de trabajo para la interpretación de análisis de suelos

Conclusiones

- La aplicación de emendas tiene un efecto positivo en el crecimiento de la melina.
- El crecimiento medio de las plantaciones puede ser mejorado mediante silvicultura intensiva.
- El uso de VANTs permite aumentar la velocidad de captura de información con calidad similar a la obtenida bajo medio tradicionales.

VIII Encuentro de Investigación y Extensión, San Carlos 2018



VICERRECTORÍA DE INVESTIGACIÓN Y EXTENSIÓN
DIRECCIÓN DE PROYECTOS
Centro de Transferencia Tecnológica y Educación Continua (CTEC)

otorgan el presente certificado a

Mario Guevara Bonilla

por su participación en el VIII Encuentro de Investigación y Extensión con la presentación del póster

Desarrollo de un programa de silvicultura intensiva y de precisión para el aumento de la productividad de plantaciones forestales.



Dr. Alexander Berrocal Jiménez
Vicerrector de Investigación y Extensión



M.B.A. Doris Pérez-Murillo
Coordinadora CTEC



Ing. Andrés Robles Ramírez, M.Sc.
Director Dirección de Proyectos

San Carlos, 7 de diciembre de 2018

Anexo 7. Lista de participantes del Día de campo Avances en silvicultura intensiva, plantaciones dendroenergéticas y modelo de producción de tarimas.

www.tec.ac.cr

TEC Tecnología de Costa Rica

20 de junio del 2019

**DÍA DE CAMPO
AVANCES EN SILVICULTURA INTENSIVA, PLANTACIONES ENERGÉTICAS
Y MODELO DE PRODUCCIÓN DE TARIMAS**

LISTA DE PARTICIPANTES

	NOMBRE	FIRMA
1	Andrés Cortés	[Firma]
2	Fredy Muñoz A.	[Firma]
3	Diego Coto Góngora	[Firma]
4	Jairo González Chaves	[Firma]
5	Cristian Ramírez Barrantes	[Firma]
6	Edwin Muñoz	[Firma]
7	Victor Zamora	[Firma]
8	Alfonso Barrantes P.	[Firma]
9	José Villalobos Ruíz	[Firma]
10	Georgina Jiménez Díaz	[Firma]
11	Maricela Madroño Mora	[Firma]
12	Kendall Herrera G.	[Firma]
13	Ysabely Badilla Valverde	[Firma]
14	William M. de la Cruz	[Firma]
15	Edwin Espinoza	[Firma]
16	Gilberto Larios	[Firma]
17	Dámaso Barrantes	[Firma]
18	José González Vargas	[Firma]
19	J. Gabriel Villalta Salvo	[Firma]

www.tec.ac.cr

TEC Tecnología de Costa Rica

20	Frank Vargas Arce	[Firma]
21	Edwin Viquez	[Firma]
22	Ernesto G. Prieto	[Firma]
23	F. Leinbach Ojeda	[Firma]
24	José Antonio Muñoz	[Firma]
25	Thierry Muñoz	[Firma]
26	Humberto Sánchez P.	[Firma]
27	Manoel Antonio González	[Firma]
28	William del Valle Fariña	[Firma]
29	Narciso Barrantes	[Firma]
30	William Barrantes P.	[Firma]
31		
32		
33		
34		
35		
36		
37		
38		
39		
40		

Anexo 8. Certificado de participación en el VII Encuentro de Finanzas Rurales



Innovaciones tecnológicas para el aumento de la productividad en plantaciones y sistemas agroforestales / Panel 3



Mario Guevara Bonilla



Anexo 9. Carta agradecimiento por cooperación con vuelo de dron en proyecto Amón Ra

www.tecnac.cr

TEC | Tecnológico
de Costa Rica

Escuela de
Arquitectura
y Urbanismo

EAU-734-2018 MEMORANDO

Para: M.Sc. Mario Guevara Bonilla, Investigador
Escuela de Ingeniería Forestal

De: Dr. Arq. David Porras Alfaro, Coordinador
Proyecto de Investigación Amón_RA
Escuela de Arquitectura y Urbanismo



Fecha: 25 de septiembre, 2018

Asunto: **Agradecimiento. Vuelo de Drone en Barrio Amón.**

Estimado Mario.

Como coordinador del Proyecto de Investigación Amón_RA: Implementación de la realidad aumentada como herramienta para la puesta en valor y difusión del paisaje urbano histórico de barrio Amón, deseo agradecer en nombre del equipo la colaboración brindada por su persona y la MA. Andrea Tapia Arenas en la planificación previa y realización del vuelo de dron en Barrio Amón, el pasado jueves 20 de septiembre. Esta colaboración ha sido fundamental para obtener el insumo necesario para generar un ortomosaico actualizado del Barrio.

Por nuestra parte, quedamos en la mejor disposición de colaborar entre ambas escuelas en futuros requerimientos, a partir de los recursos humanos y técnicos disponibles. La participación del Proyecto "Desarrollo de un programa de silvicultura intensiva y de precisión para el aumento de la productividad de plantaciones forestales", coordinada por su persona, y en la que participan los investigadores Ph.D Edwin Esquivel Segura, MA. Andrea Tapia Arenas y M.Sc. Rodolfo Canessa Mora, será registrado como parte de los colaboradores que participaron en el desarrollo de la aplicación Amón_RA.

Un cordial saludo.

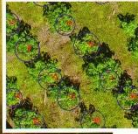
DPA/xrq

cc: M.Sc. Alejandro Meza Montoya, Director Escuela de Ingeniería Forestal
MA. Andrea Tapia Arenas, Investigadora
Ing. Marihel Jiménez Montero, Oficial de Proyectos VIE,
Archivo.

Anexo 10. Publicación divulgativa Revista Germinar. Silvicultura de precisión por medio de VANTs como herramienta para el monitoreo y aumento de la productividad de plantaciones forestales.



ACTUALIDAD



Silvicultura de precisión por medio de VANTs

como herramienta para el monitoreo y aumento de la productividad de plantaciones forestales

Mario Cuervo Bonilla
Ingeniero Forestal, Escuela de Ingeniería Forestal, TEC
miguervabonilla@tec.ac.cr

La silvicultura, tanto de bosques como de plantaciones, ha evolucionado a una silvicultura más intensiva o sitio específica. La utilización de sensores de alta tecnología y herramientas analíticas para el manejo sitio específico de un rodal se conoce como silvicultura de precisión. Este nuevo concepto de silvicultura pretende planificar y ejecutar actividades sitio específicas que buscan aumentar la productividad, reducir costos, aumentar ganancias y ser sostenibles con el ambiente.

Una de las ventajas de la silvicultura de precisión es que puede realizarse con cualquier especie, genotipo y bajo distintas condiciones de suelo y clima. Para silvicultura de precisión se pretende conocer las limitaciones sitio específicas y adicionalmente la variabilidad que se puede encontrar en un sitio con el fin de poder manejar estas condiciones para una especie en particular.

El desarrollo de la agricultura ha mejorado la planificación del establecimiento, monitoreo del estado de los cultivos, uso eficiente del agua y aplicación de productos químicos. Sin embargo, a nivel forestal se ha limitado mayormente al uso del GPS y sistemas de información geográfica.

Recientemente con la incorporación de vehículos aéreos no tripulados (VANTs) o drones, como se los conoce popularmente se abrió una nueva posibilidad para recopilar información sobre el rodal de una manera rápida, precisa, con gran resolución espacial y desde una perspectiva.

Entre los principales productos que se pueden obtener a partir de imágenes de un VANT se encuentran: imágenes de color verdadero (RGB) de una alta resolución, modelos digitales de superficie creados a partir de nubes de puntos, modelos tridimensionales y ortomosaicos de gran resolución espacial. A partir de estos productos se pueden desarrollar distintas aplicaciones que permitan un manejo sitio específico de la plantación y una mayor eficiencia en el uso de recursos.

Es por tal motivo que la Escuela de Ingeniería Forestal del Instituto Tecnológico de Costa Rica ha planteado un proceso de investigación que utiliza vehículos aéreos no tripulados para el monitoreo y manejo de plantaciones forestales. Este proyecto es el primero de su tipo que incursiona en la tecnología VANT y sus posibles aplicaciones.

Aplicaciones desarrolladas

Desde noviembre del 2017 se han efectuado vuelos mensuales sobre una plantación de *Gmelina arborea* recién establecida. Con base en los productos generados a partir del procesamiento de imágenes se han realizado las siguientes aplicaciones:

A. Uso de la tierra, monitoreo de actividades y cálculo de áreas. A partir de las imágenes se obtuvo información detallada sobre el uso de la tierra, localización de árboles remanentes, supervisión de actividades de establecimiento de la plantación y cálculo de áreas efectivas y áreas decaídas de la misma. Esta aplicación es la más sencilla pero permite evaluar desde otra perspectiva actividades cotidianas que se realizan en plantaciones forestales.

B. Conteo de árboles. A partir de las imágenes y de la creación de nubes de puntos se desarrolló un algoritmo que permite el conteo de árboles en plantaciones recién establecidas. Esta herramienta, desarrollada en conjunto con las Escuelas de Ingeniería en Electrónica e Ingeniería en Computación del Tecnológico de Costa Rica, permitirá realizar muestreos para determinar la mortalidad inicial en el establecimiento de plantaciones cubriendo mayores áreas de forma más rápida (figura 1).

Figura 1. Conteo de árboles de Melina de 5 meses de edad por medio de una interpretación algorítmica de una ortofoto tomada con un dron Mavic Pro, Los Chiles, Costa Rica.

C. Estimación de alturas. A partir del modelo digital de superficie y de elevación, se ha generado un modelo de altura del dosel que permite estimar las alturas de los árboles. Los valores estimados se han comparado con mediciones realizadas en parcelas permanentes en el campo con una vara telescópica. Algunos resultados se muestran en el cuadro 1.

Cuadro 1. Estimación de alturas a partir de un modelo de alturas del dosel y comparación con valores de campo.

árbol	Altura vara telescópica (m)	Altura con dron	Diferencia de alturas entre métodos (m)
1	2,8	2,5	0,3
2	2,18	2,22	0,04
3	2,29	2,61	0,32
4	2,74	3,00	0,26
5	2,42	2,62	0,20
6	2,2	2,07	0,13

Siguientes pasos

Un manejo silvícola de precisión requerirá de sistemas integrados que incorporen tecnología apropiada y oportuna para una mayor preparación de sitio, control de malezas, control de plagas y enfermedades y manejo de la nutrición entre otras.

Ante tal panorama, el uso de cámaras multiespectrales y posterior cálculo de índices de vegetación aparecen como herramientas importantes para el diagnóstico, monitoreo y posterior manejo de la nutrición en plantaciones forestales así como de enfermedades forestales.

Las aplicaciones descritas así como otras puntuales usos permiten realizar evaluaciones puntuales sobre distintas actividades silviculturales dentro de las plantaciones. Al mejorar el proceso de evaluación, se pueden tomar mejores decisiones sobre el uso eficiente de los recursos y así mejorar la productividad forestal.

El uso de vehículos aéreos no tripulados junto con técnicas de silvicultura de precisión ayudaría a los productores forestales a cumplir más fácilmente los requerimientos mínimos para optar por el pago por servicios ambientales (PSA), así como a cumplir con las metas establecidas en el Plan Nacional de Desarrollo Forestal (PNDF) 2011-2020, la Estrategia REDD+, la mitigación del cambio climático y la carbono neutralidad del país.

Coautores
Eduin A. Esquivel Segura
Ing. For. Escuela de Ingeniería Forestal, TEC
Michael Garro Chavarria
Ingeniero Forestal.

ACTUALIDAD

Anexo 11. Publicación divulgativa Revista Germinar. Encalado: una opción para el mejoramiento de la productividad forestal

ACTUALIDAD 

Encalado: una opción para el mejoramiento de la productividad forestal

Edwin A. Esquivel Segura · Ingeniero Forestal
Profesor Escuela de Ingeniería Forestal · Instituto Tecnológico
eesquivel@itcr.ac.cr
Mario Guevara Bonilla · Ingeniero Forestal
Profesor Escuela de Ingeniería Forestal · Instituto Tecnológico
maguevara@itcr.ac.cr

La acidez del suelo es un problema conocido desde hace muchos años, tanto así que este ha sido uno de los principales criterios empleados en los sistemas de clasificación de suelos. A pesar de que es de conocimiento popular que aplicar enmiendas para neutralizar la acidez trae beneficios para el crecimiento y desarrollo de un cultivo, no ha sido una práctica común en el campo forestal.

Muchos de los sistemas productivos con árboles en Costa Rica, han sido establecidos en suelos ácidos (suelos ultisoles) generando un crecimiento pobre y una baja productividad. Durante el 2018, cuatro resultados independientes generados por la Escuela de Ingeniería Forestal del TEC a través de un proyecto de investigación y tesis de licenciatura Forestal, han mostrado los beneficios de encalar y la influencia que la corrección de la acidez del suelo puede tener en el desarrollo de especies forestales como melina, teca, laurel; entre otras.

El grupo de Silvicultura Intensiva con el proyecto "Desarrollo de un programa de silvicultura intensiva y de precisión para el aumento de la productividad de plantaciones forestales", ha evidenciado que controlar la acidez en una plantación de melina permite aumentar el desarrollo de los árboles duplicando su altura y diámetro (cuadro 1). El sitio de estudio presenta una acidez alta y porcentajes de saturación de acidez superiores al 30%.

Cuadro 1. Crecimiento promedio de diámetro de una plantación de *Gmelina arborea* a los 8 meses de edad, San Carlos, Costa Rica.

Sitio	Diámetro (cm)
Sitio encalado adecuadamente	7,5
Sitio sin encalar	3,7

El interés del proyecto es contar no solo con una medición del efecto del encalado en términos silvícolas, sino también, contar con una evaluación financiera del mismo.

Figura 1: Crecimiento de la Melina en un SAF con yuca en la Zona de Pital de San Carlos a los 6 meses de edad. Nótese el cierre de copas a un distanciamiento de 4X3 metros.



Figura 2: Evidencias de deficiencias nutricionales de los sitios donde se contaba con mayor acidez en la misma parcela de Pital de San Carlos.



Anexo 12. Carta de aceptación del artículo científico Uso de vehículos aéreos no tripulados (VANTS) para el monitoreo y manejo de los recursos naturales: una síntesis.



ET 021-2020

A quien interese

La suscrita, editora de la revista *Tecnología en Marcha*, cédula de identidad número tres-cuatrocientos ochocientos veinticuatro, hace constar que el artículo Uso de vehículos aéreos no tripulados (VANTS) para el monitoreo y manejo de los recursos naturales: una síntesis, de los autores Mario Guevara Bonilla, Ana Sofía Meza Leandro, Edwin Antonio Esquivel Segura, Dagoberto Arias Aguilar, Andrea Tapia Arenas y Federico Masís Meléndez será publicado en la revista *Tecnología en Marcha* vol. 33, no. 4, correspondiente al periodo octubre-diciembre del 2020.

La revista se encuentra indexada en Latindex, DIALNET, Scielo y REDIB.

Se extiende la presente a solicitud de las interesadas, en la ciudad de Cartago, el veinticuatro de febrero del dos mil veinte.



M. Sc. Alexa Ramirez Vega, Editora
Revista Tecnología en Marcha



ARV

C. Tecnología en Marcha

Anexo 13. Portada manual de procesamiento de imágenes a partir de vehículos aéreos no tripulados utilizando software libre

2019

Procesamiento de imágenes a partir de vehículos aéreos no tripulados utilizando software libre

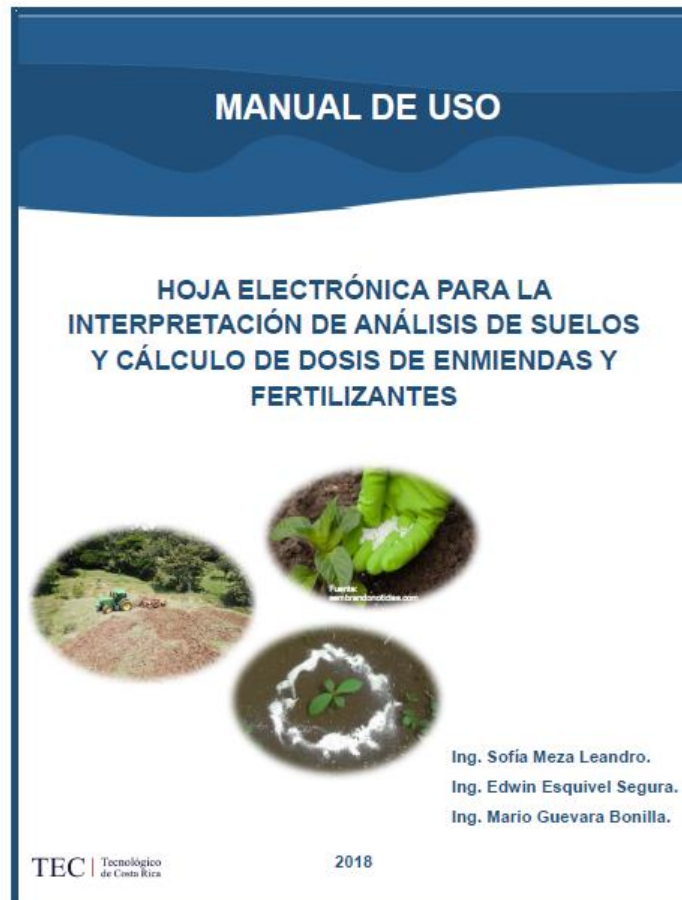


Andrea Tapia Arenas
Mario Guevara Bonilla
Edwin Esquivel Segura

TEC | Tecnológico de Costa Rica



Anexo 14. Hoja electrónica y manual de uso de la hoja electrónica para la interpretación de análisis de suelos y cálculo de dosis de enmiendas y fertilizantes.



Anexo 15. Evidencias de la distribución de la hoja electrónica para la interpretación de muestras de suelo y cálculo de dosis de enmiendas y fertilizantes.

ENTAS DE BÚSQUEDA
BUSCAR

Reenviar Reunión MI Más

Bandeja de entr... Al jefe Listo Crear nuevo

Mover Reglas OneNote

No leído/Leído Categorizar Seguimiento

Buscar personas Libreta de direcciones Filtrar correo electrónico

Responder Responder a todos Reenviar MI

miércoles 19/6/2019 6:47 p. m.
Mario Guevara Bonilla

Hoja para interpretación de análisis de suelos

Para Patricia Barrantes; Jose Gonzalez Vargas; Randall Herrera Gonzalez; Randall Peraza; ernesto G. Prado; Erick Vargas

CC Humberto Gómez; Mario Piedra; acalvo@fonafifo.go.cr; Gabriel Villalta; Alfonso Del Valle; abarrantes@oficinaforestalcr.org; Alexander Montoya; Javier Ramírez; Floribeth Ortega Garita; Julissa Fonseca; vmadrigal@fonafifo.go.cr; Arnulfo Díaz Hernández; Jose Alberto Villalobos Quirós; Andrés Paniagua Hernández Paniagua Hernández; Luis F. Pérez O.; VSamuels@fonafifo.go.cr; Jair Granados Chacón; Edwin Esquivel Segura

Seguimiento. Comienza el jueves, 18 de junio de 2020. Vence el jueves, 18 de junio de 2020.

Mensaje Manual hoja electrónica cal y fertilizante.pdf (806 KB) Encalado y fertilización_Versión 1.2.xlsx (592 KB)

Estimados colegas

Adjunto una **hoja** de Excel y su respectivo manual para la interpretación de análisis de **suelos** y cálculo de dosis de enmiendas y fertilizantes. Esta **hoja** de Excel pesa 500 kb por lo que puede ser accesada sin dificultad desde un celular o una Tablet. Esta **hoja** es un producto del grupo de silvicultura intensiva del TEC y pretende facilitar la labor de interpretación y recomendación del manejo de la fertilidad de **suelos** forestales.

Espero les sea de mucha utilidad

Saludos cordiales

Mario

No se puede iniciar sesión en SharePoint.

ACTUALIZANDO Elementos enviados. CONECTADO A: MICROSOFT EXCHANGE 100%

Reenviar Responder a todos Reenviar MI

lunes 25/11/2019 1:56 p. m.
Mario Guevara Bonilla

Hoja de interpretación análisis de suelos

Para Gilmar Navarrete Chacón

Mensaje Manual hoja electrónica cal y fertilizante.pdf (806 KB) Encalado y fertilización_Versión 1.2.xlsx (592 KB)

Estimado Gilmar

Adjunto una **hoja** electrónica y su respectivo manual para la interpretación de análisis de **suelos**. Espero que esta herramienta sea de interés para ustedes en FONAFIFO

Saludos

Mario

No se puede iniciar sesión en SharePoint.

TODAS LAS CARPETAS ESTÁN ACTUALIZADAS. CONECTADO A: MICROSOFT EXCHANGE 100%

Anexo 16. Publicación científica en preparación “Metodología para la evaluación física de los procesos de mecanización de suelos en plantaciones forestales

Metodología para la evaluación de la calidad física de procesos de mecanización de suelos en plantaciones forestales

Mario Guevara-Bonilla, Edwin Esquivel-Segura, Federico Masís Meléndez, Natalia Gómez-Calderón, Michael Garro-Chavarría

Resumen

La mecanización del suelo es una práctica poco utilizada en el sector forestal costarricense debido a que algunos de los sitios no tienen posibilidad de labrarse mecánicamente, ocasionando tercerización de las labores, cuya consecuencia ha sido falta de supervisión y evaluación técnica del acondicionamiento del suelo. El objetivo del presente trabajo fue proponer una metodología para evaluar la calidad de los procesos de mecanización de suelo como herramienta para productores forestales. Para la elaboración de la metodología, se planteó un formulario de campo que evaluó información general del sitio de estudio, así como variables físicas de suelo como densidad aparente (Da) y textura y variables mecánicas en campo como resistencia a la penetración (RP), plasticidad y condiciones de operación como profundidad de trabajo y velocidad de avance. Posteriormente se validó el formulario en un establecimiento de una plantación forestal de la especie *Gmelina arborea* en la zona norte de Costa Rica. Mediante un muestreo sistemático con arranque aleatorio se tomaron 30 puntos de medición. Se evaluó un tratamiento de labranza vertical, realizado con subsolador a 90 cm de profundidad promedio, propulsado con un tractor de cadena Caterpillar D6, a una velocidad de avance promedio de XXX Los resultados muestran que ... XXXXXXXXXXXX.

Palabras clave: labranza vertical, melina, Costa Rica.