

INSTITUTO TECNOLÓGICO DE COSTA RICA
VICERRECTORÍA DE DOCENCIA
ESCUELA DE INGENIERÍA AGRÍCOLA



Informe de Trabajo Final de Graduación presentado a la
Escuela de Ingeniería Agrícola como requisito parcial para
optar al grado de Licenciado en Ingeniería Agrícola

DETERMINACIÓN DEL COMPORTAMIENTO DEL SUELO POR MEDIO DE
FOTOGAMETRÍA, EN LA ZONA NORTE DE CARTAGO, RELACIONANDO
PROPIEDADES MECÁNICAS DEL SUELO Y PRECIPITACIÓN

ANDREY ESTEBAN AGUILAR MARTÍNEZ

CARTAGO, 2018

DETERMINACIÓN DEL COMPORTAMIENTO DEL SUELO POR MEDIO DE
FOTOGRAMETRÍA, EN LA ZONA NORTE DE CARTAGO, RELACIONANDO
PROPIEDADES MECÁNICAS DEL SUELO Y PRECIPITACIÓN

ANDREY AGUILAR MARTÍNEZ

Informe de Trabajo Final de Graduación presentado a la
Escuela de Ingeniería Agrícola como requisito parcial para
optar al grado de Licenciado en Ingeniería Agrícola

Milton Solórzano Quintana

Asesor - Lector

Marvin Villalobos Araya

Director Escuela
Ingeniería Agrícola

INSTITUTO TECNOLÓGICO DE COSTA RICA

CARTAGO, COSTA RICA

2018

DEDICATORIA

*A mis padres, quienes siempre me brindan apoyo y consejos,
además de permitirme la valiosa oportunidad de estudiar.*

AGRADECIMIENTOS

A Dios por ser quien me dio la salud, la perseverancia y la tranquilidad para poder culminar esta etapa de mi vida.

A mi familia por apoyarme incondicionalmente a lo largo de mi formación educativa.

A mis amigos y compañeros del Tecnológico quienes compartieron conmigo infinidad de buenos y malos momentos.

A mis profesores por transmitir sus conocimientos y consejos para tener una excelente educación académica.

ÍNDICE DE CONTENIDOS

RESUMEN	1
INTRODUCCIÓN	5
REVISIÓN BIBLIOGRÁFICA	8
METODOLOGÍA	18
MATERIALES.....	19
PROCEDIMIENTO.....	21
RESULTADOS Y DISCUSIÓN DE RESULTADOS	31
ANÁLISIS SOCIAL, AMBIENTAL Y ECONÓMICO	56
Análisis social	57
Análisis ambiental	57
Análisis económico	58
CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES.....	64
CONCLUSIONES.....	65
RECOMENDACIONES.....	66
REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS	67
ANEXOS	83

ÍNDICE DE FIGURAS

Figura 1. Profundidad de colocación de semilla y alcance de raíces.....	13
Figura 2. Ubicación del área de estudio.	19
Figura 3. Puntos de control en el terreno para ajuste en fotogrametría.....	22
Figura 4. Área cubierta por cada implemento. Fuente: propia del autor.	23
Figura 5. Visualización general del geoportal de suelos	24
Figura 6. Geoportal de suelos sin capa seleccionada.....	25
Figura 7. Programación de vuelo automático de dron.....	26
Figura 8. Alinear imágenes en Agisoft para creación de nube de puntos dispersa.	26
Figura 9. Construcción de nube de puntos densa.	27
Figura 10. Puntos de control en campo.....	28
Figura 11. Creación de malla.	28
Figura 12. Ventana de creación de DEM.....	29
Figura 13. Mapa del levantamiento topográfico	32
Figura 14. Levantamiento topográfico con Estación Total.....	33
Figura 15. Puntos de muestreo para textura del suelo	33
Figura 16. Puntos en campo de medición de resistencia a la penetración	34
Figura 17. Medición con penetrómetro antes de mecanizar.	35
Figura 18. Utilización de penetrómetro en campo.	35
Figura 19. Mecanización con arado rotativo, 3 de febrero de 2018.	36
Figura 20. Mecanización con arado rotativo, 4 de febrero de 2018.	36
Figura 21. Mecanización con arado de cinceles, 4 de febrero de 2018.	37
Figura 22. Preparación del suelo con rotador y arado de cinceles.	37
Figura 23. Vista aérea de ambos tractores mecanizando.	38
Figura 24. Arado excavador, también conocido como palín.....	38
Figura 25. Comportamiento de los valores de resistencia a la penetración a 20 cm	40
Figura 26. Comportamiento de los valores de resistencia a la penetración a 40 cm	42
Figura 27. Puntos de muestreo de densidad aparente	43
Figura 28. Vista sobre el área de estudio con capa de orden de suelos seleccionada.....	45
Figura 29. Modelo de Elevación Digital del 2-2-2018	47
Figura 30. Modelo de Elevación Digital del 15-2-2018	47
Figura 31. Modelo de Elevación Digital del 19-2-2018	48
Figura 32. Modelo de Elevación Digital del 28-2-2018	48
Figura 33. Modelo de Elevación Digital del 17-3-2018	49
Figura 34. Modelo de Elevación Digital del 31-3-2018	49
Figura 35. Marca de referencia en los tubos colocados en campo.	51
Figura 36. Pluviómetro instalado en San Rafael de Irazú, Pacayas, Cartago.	54
Figura 37. Comportamiento de la precipitación en el transcurso del tiempo durante el proyecto.	55
Figura 38. Cuento de papas en un área de 5 m2.....	60

ÍNDICE DE CUADROS

Cuadro 1. Porcentaje de partículas en cada muestra de suelo.	34
Cuadro 2. Valores de resistencia a la penetración a 20 cm de profundidad.....	39
Cuadro 3. Mediciones de resistencia a la penetración a 40 cm de profundidad.....	41
Cuadro 4. Valores de densidad aparente.....	44
Cuadro 5. Especificaciones de cada Modelo de Elevación Digital.	46
Cuadro 6. Elevaciones en m.s.n.m para cada punto de referencia en diferentes fechas.	50
Cuadro 7. Movimiento y pérdida de suelo en área con arado de cinceles.	52
Cuadro 8. Promedio de densidad aparente con arado de cinceles.	52
Cuadro 9. Movimiento y pérdida de suelo en área con palín.....	53
Cuadro 10. Promedio de densidad aparente con palín.....	53
Cuadro 11. Precipitación del lugar entre cada fecha de vuelo de dron.....	54
Cuadro 12. Costo de preparación del terreno.....	58
Cuadro 13. Costo de método fotogramétrico.....	59
Cuadro 14. Cuento final de papas por muestreo de zona.....	60
Cuadro 15. Cosecha esperada según proyección.	60
Cuadro 16. Ingresos esperados según tipo de mecanización.	61
Cuadro 17. Costo económico de suelo perdido.....	62
Cuadro 18. Comportamiento de flujo de efectivo durante los próximos cinco años.....	63
Cuadro 19. Criterios de evaluación de proyectos.....	63
Cuadro 20. Resultados de la prueba Bouyoucos.....	83
Cuadro 21. Cantidad de papas en zona de mecanización con arado de cinceles.....	84
Cuadro 22. Cantidad de papas en zona de mecanización con arado excavador.....	84

RESUMEN

La agricultura es la actividad económica con mayor impacto en la población de la zona Norte de la provincia de Cartago, cientos de productores cultivan año con año sus terrenos de manera muy acelerada para poder abastecer a todo el territorio nacional, debido a esto existe un gran desgaste de los terrenos que a su vez son labrados generalmente por medio de mecanización con tractores, incluyendo terrenos con altas pendientes, los cuales son altamente propensos a la erosión hídrica. Este proyecto se tiene como objetivo principal, determinar el comportamiento en el nivel del suelo por medio de fotogrametría a través del tiempo con el cultivo de papa (*Solanum tuberosum*). Se realizaron pruebas de resistencia a la penetración, muestreo de densidad aparente, vuelos con dron y medición en campo para verificar variaciones de nivel en el suelo por medio de fotogrametría por causa de erosión hídrica o reacomodo de las partículas del suelo, esto a partir de Modelos de Elevaciones Digitales que permiten conocer la altura en puntos específicos del terreno en distintos días de medición con dron; y se analizó la precipitación de la zona como un posible factor en el movimiento del suelo. A partir de la metodología realizada se obtuvo distintos resultados, entre ellos: la resistencia a la penetración es menor cuando se mecaniza con palín y también se tiene menor tasa de pérdida de suelo, se logra detectar por medio de fotogrametría la medición del cambio de nivel de la superficie del suelo; sin embargo, son datos altos que no corresponden realmente a la realidad del terreno. Conforme aumenta la precipitación también lo hace la pérdida de suelo, incluso la tasa de erosión es mayor en terrenos mecanizados con arado de cinceles, llegando en este proyecto a un valor de 5,841 ton/ha. Se recomienda seguir realizando investigación de este tipo, por parte de universidades y profesionales, ya que es un bien para el sector académico y económico de Costa Rica.

PALABRAS CLAVE

Suelo, fotogrametría, Modelo de Elevación Digital, precipitación.

ABSTRACT

Agriculture is the economic activity with the greatest impact on the population of the northern zone of the province of Cartago. Hundreds of farmers grow their land year after year in a very accelerated way to supply the entire national territory, due to this there is a large wear of the land that in turn is generally worked through mechanization with tractors, including terrains with steep slopes, which are highly prone to water erosion. The main objective of this project is to determine the behavior at ground level by means of photogrammetry through time with the cultivation of potatoes (*Solanum tuberosum*). Penetration resistance tests, bulk density sampling, drone flights and field measurements were performed to verify level variations in the soil by means of photogrammetry due to water erosion or rearrangement of soil particles, and the precipitation of the area as a possible factor in the movement of the soil. From the methodology carried out, different results were obtained, among them: the resistance to penetration is lower when machining with spade machine and there is a lower rate of soil loss, it is possible to detect by means of photogrammetry the measurement of the level change of the surface of the ground; however, they are high data that do not really correspond to the reality of the terrain. As the precipitation increases, so does the loss of soil, even the erosion rate is higher in mechanized lands with chisel plows, reaching a value of 5,841 ton/ha in this project. It is recommended to continue doing research of this type, by universities and professionals, as it is a good for the academic and economic sector of Costa Rica.

KEY WORDS

Soil, photogrammetry, Digital Elevation Model, precipitation.

1. INTRODUCCIÓN

El suelo es la base de la agricultura y es el medio en el cual crecen la mayor parte de las plantas destinadas a la producción de alimentos, se estima que cerca del 95% de los alimentos se producen de manera directa en él.

Las proyecciones señalan que en el año 2050 se tendrá una población superior a los 9000 millones de personas; además, existe la agravante por la competencia del agua y la tierra y el cambio climático, por lo que la seguridad alimentaria actual y del futuro depende de la capacidad de mejorar los rendimientos y la calidad de los alimentos, utilizando los suelos ya dedicados a la agricultura (FAO, 2015).

Según Zinck (2005), los términos de la sustentabilidad agrícola, incluyendo criterios e indicadores para la evaluación, son específicos, entre otras consideraciones a las escalas espaciales y temporales, a los niveles jerárquicos de la estructura de los sistemas agrícolas, y a los tipos de sistemas de producción a nivel de finca. Por lo tanto, se necesita una amplia variedad de enfoques para evaluar correctamente la sustentabilidad a diferentes escalas, niveles y tipos de agricultura. Se han desarrollado innovaciones tecnológicas y metodológicas para la recolección de datos y su conversión en información, a través de uso creciente de la tecnología de la información en tres áreas principales: teledetección, sistemas de información geográfica y estadísticas espaciales.

Con respecto a la zona de desarrollo del presente estudio, la producción agropecuaria es una de las principales actividades económicas que caracterizan a la Región Central Oriental, sus principales cultivos la producción de hortalizas como: cebolla, zanahoria, repollo, coliflor, brócoli, remolacha, tomate, chile dulce y papa, siendo este último el principal ya que representa el 32% del área total en hortalizas. Cerca del 85% de las familias de la zona Norte de Cartago dependen del cultivo de papa como su medio de vida, alrededor de 800 productores siembran aproximadamente 1.469 ha por año, teniendo una producción promedio de 33.412 kg/ha, siendo esto un valor bruto de producción de 25.427 millones anuales; (INFOAGRO, 2015).

La misma fuente anterior menciona que la vertiente norte es la mayor productora de sedimentos, debido a factores como pendiente, clima, tipo y uso del suelo y tecnologías de producción. Esta zona genera el 73% de los sedimentos producidos, de los cuales llegan anualmente cerca de 1 millón de toneladas de sedimentos al embalse de Cachí y alrededor de 1,5 millones de toneladas al embalse de Angostura.

Debido a esta problemática social y económica local, es importante dar a conocer un enfoque técnico sobre lo que sucede con el suelo y distintos factores implicados, por lo que en este proyecto se tiene como objetivo principal, evaluar el comportamiento del suelo por medio de fotogrametría, en la zona alta de la provincia de Cartago con el cultivo de papa (*Solanum tuberosum*). Para alcanzar este objetivo se debe lograr alcanzar los siguientes tres objetivos específicos: a) analizar el efecto en las propiedades mecánicas del suelo según el tipo de mecanización realizada en el transcurso del cultivo. b) comparar variaciones en el nivel de suelo mediante Modelos de Elevación Digitales y el uso de varillas como indicadores de erosión. c) examinar la relación de la erosión debido a la precipitación. d) analizar los aspectos ambientales, económicos y sociales que se generen a partir del trabajo de investigación.

2. REVISIÓN BIBLIOGRÁFICA

2.1. Compactación del suelo

La degradación de la estructura del suelo se conoce también como compactación, se considera el tipo más serio de degradación de la tierra causada por prácticas de labranza convencional, aunque esta forma es reversible y puede ser previsible o controlable; la compactación es un problema mundial presente en todos los suelos y niveles de producción agrícola, no solo las fincas mecanizadas sufren este problema, sino también los equipos de tiro humano y animal pueden causar degradación de la estructura; por ejemplo, el pisoteo de caballos y bueyes produce presiones de la tierra de hasta 150 kPa y 250 kPa respectivamente (FAO, s.f.).

Los mayores daños de compactación se encuentran en campos agrícolas donde se practica agricultura intensiva, es decir, uso elevado de maquinaria agrícola. Normalmente existe problemas de compactación a diferentes profundidades, dependiendo del tipo de implemento que se use en la preparación del suelo, del contenido de humedad en el momento de la mecanización y de la intensidad de uso del suelo (INTAGRI, 2017)

La maquinaria agrícola provoca en ocasiones una disminución en el rendimiento por compactación del suelo, en la mayoría de los casos existe un efecto negativo para el desarrollo vegetal. El suelo se degrada debido a un manejo compactante, cuando esto sucede, se presenta una alteración en factores que generan el arraigamiento de los suelos, entre estos están la densidad aparente, resistencia a la penetración, resistencia cortante y capacidad del aire en el suelo (Ellies, MacDonald & Ramírez, 1991).

2.2. Resistencia a la penetración

La productividad del suelo no solo depende de los contenidos nutricionales, sino también de las características físicas, estas son el resultado de la interacción que se origina entre las distintas fases (suelo, agua y aire) y de la proporción en la que se encuentran cada una de estas. La condición física de un suelo determina su capacidad de sostenimiento, facilidad para la penetración de raíces, circulación del aire, capacidad de almacenamiento de agua, drenaje, retención de nutrientes, entre otros. Las propiedades físicas más influyentes en el desarrollo de los cultivos son: color del suelo,

textura del suelo, humedad del suelo, porosidad del suelo, penetrabilidad. Esta última propiedad física está ligada a la densidad aparente y al nivel de humedad del suelo, es la resistencia que presenta un suelo a la penetración radical; además, está relacionada con el volumen de raíces (INTAGRI, 2017).

La resistencia mecánica del suelo es un indicador de compactación, su medición se puede realizar mediante penetrómetros y penetrógrafos, estos equipos miden la fuerza necesaria para hincar un cono estándar en el suelo; la resistencia a la penetración es una medida indirecta de la fuerza requerida de las raíces para penetrar los poros o los canales existentes en el suelo, o bien, para deformar la estructura con el fin de brindar soporte, absorber nutrientes y agua. La resistencia a la penetración presenta variación espacial (vertical y horizontal) y temporal, por efecto de procesos naturales y el mismo manejo del suelo (Cortés, Camacho & Leiva, 2013).

Según Gómez, Villagra & Solórzano (2018), en una reciente recopilación realizada sobre labranza mecanizada y el impacto en la conservación del suelo mencionan, valores de resistencia a la penetración de 1,5 MPa pueden reducir el crecimiento de las raíces de un cultivo, mientras que valores superiores a 2,1 MPa lo limitan.

2.3. Densidad aparente

La densidad aparente se ve alterada debido a un inadecuado manejo del suelo. Según Thompson & Troeh (1988), la densidad aparente es el peso de los sólidos del suelo por unidad de volumen total del mismo, el volumen de poros es una parte del volumen de suelo medido para la estimación. La densidad aparente de los horizontes A en suelos minerales suele variar entre 1,0 y 1,6 g/cm³; existe una regla general, la cual en los suelos de textura fina hay mayor porosidad y menor densidad aparente que en los suelos arenosos. La densidad aparente varía según su grado de acomodo de las partículas del suelo (compacidad), la compresión hace descender su volumen de poros y aumenta su peso por unidad de volumen.

Según Rubio (2010), la prueba para medir la densidad aparente se hace retirando del campo una muestra de suelo de volumen conocido y se seca en el horno a 105 °C durante 24 horas hasta que alcanza un peso constante. La densidad aparente se calcula por medio de la ecuación 1, donde se divide el peso seco del suelo por el volumen que ocupaba en el campo.

Los valores pueden llegar a ser inferiores a 0,25 g/cm³ en suelos turbosos y superiores a 1,90 g/cm³ en suelos muy compactados. En suelos minerales volcánicos los valores se aproximan a 0,85 g/cm³.

2.4. Textura de suelo

Según Núñez (2006), la textura del suelo se define como la relación porcentual entre partículas menores de 2 mm de diámetro que incluye las fracciones de arena, limo y arcilla. Para la arena el tamaño es de 2,0 a 0,05 mm; el limo está establecido entre 0,05 y 0,002 mm de diámetro, y las arcillas son todas las partículas menores de 0,002 mm de diámetro. La textura puede determinarse de varias formas, una de ellas es por el método de Bouyoucos.

Este método se basa en la velocidad diferencial de sedimentación de las partículas con base en su tamaño, peso y medio en que sedimentan. Se utiliza un hidrómetro calibrado, esto debido a que conforme las partículas sedimentan, el hidrómetro cambia su nivel de flotación, este instrumento mide los gramos de sólidos en suspensión por litro de agua, en una escala de 0 – 60 g/l, con intervalos numerados de 5 en 5 gramos por litro, e intervalos no numerados pero que ayudan a indicar cada 1 g/l. El procedimiento completo se encuentra en el Anexo 1, el cual fue el que se realizó para determinar la textura de las muestras de suelo para el presente trabajo.

2.5. Mecanización del suelo

Los cultivos en su mayoría necesitan de suelos preparados, si se utiliza el equipo adecuado y se realiza en el momento idóneo cuando el suelo presenta una condición friable, entonces el costo del trabajo es rentable, ya que las siguientes actividades serán más sencillas, el

mantenimiento posterior es menor y se pueden esperar cosechas muy exitosas. La preparación del suelo busca los siguientes objetivos: Aumentar la cantidad de materia orgánica (MO), mejorar la circulación del aire dentro del suelo, disminuir presencia de enfermedades, malas hierbas e insectos perjudiciales (Alvarado, 2004). Entre los implementos disponibles en el mercado pero que no son regularmente usados en la zona de estudio es el palín, este implemento según Villalobos, Guzmán & Zúñiga (2009), el uso de palín genera velocidades de infiltración mayores que la absorción de agua del suelo, por lo que se presenta una menor probabilidad de que se produzca escurrimiento superficial y erosión del suelo, esto debido a que este implemento genera un mejor agrietamiento del suelo en las capas inferiores que otros implementos utilizados en la misma zona de estudio del presente proyecto. Además, mencionan que existe una gran ventaja en preparar el suelo con palín, ya que se rompe el piso de arado formado cuando se prepara con implementos tradicionales como arado de disco y rastra a una misma profundidad.

2.6. Indicadores y tasa de erosión

Según Cubero (1994), en el terreno se pueden observar marcas debido a la erosión, esta se puede calcular mediante una tasa de erosión, la misma se expresa en ton/ha/año. Se debe tener la siguiente información para obtener la tasa de erosión: volumen de suelo perdido, densidad aparente del suelo, tiempo de apreciación del indicador de erosión. Los pedestales son un indicador de la erosión por salpique que se pueden encontrar en campo, se realizan diversas mediciones en lugares dispersos dentro de la parcela, donde se mide la altura de la variación del nivel del pedestal.

Según la FAO (1997), la medición directa de los cambios en el nivel del suelo resulta adecuada cuando la erosión está localizada, los índices de erosión son elevados y la posición de la erosión es predecible. Los resultados de las mediciones individuales de los cambios de nivel en un punto único varían considerablemente, pero este método es sencillo y de bajo costo que permite establecer una muestra de un gran número de puntos y obtener una estimación válida. Las varillas para la medición de la erosión es un método ampliamente utilizado, consiste en clavar en el suelo una varilla medidora de manera que en su parte superior se puedan leer los cambios en el nivel de

la superficie del suelo; pueden ser de madera, hierro o cualquier otro material que no se deteriore, que sea fácil de obtener y barato.

2.7. Características del cultivo papa (*Solanum tuberosum*)

Es necesario tener en mente las características y necesidades de la planta, ya que es requisito para poder lograr una preparación del terreno para crear las mejores condiciones para la siembra, germinación de la semilla y posterior desarrollo del cultivo. En el caso de la papa (*Solanum tuberosum*), hay dos zonas particulares que requieren distintas condiciones (zona de semilla y zona de raíces). En la zona de raíces no debe estar compactado para permitir una mejor retención del agua y mayor movimiento del aire, debe estar lo suficientemente profunda para que las raíces tengan una confortable zona de desarrollo. Se debe eliminar todas las compactaciones del fondo del suelo (pie de arado), esto porque limita el desarrollo radicular y el movimiento del agua (Inostroza, 2009). La Figura 2 presenta una visual del perfil del suelo en un cultivo de papa, con su correspondiente zona de semilla y de raíces.

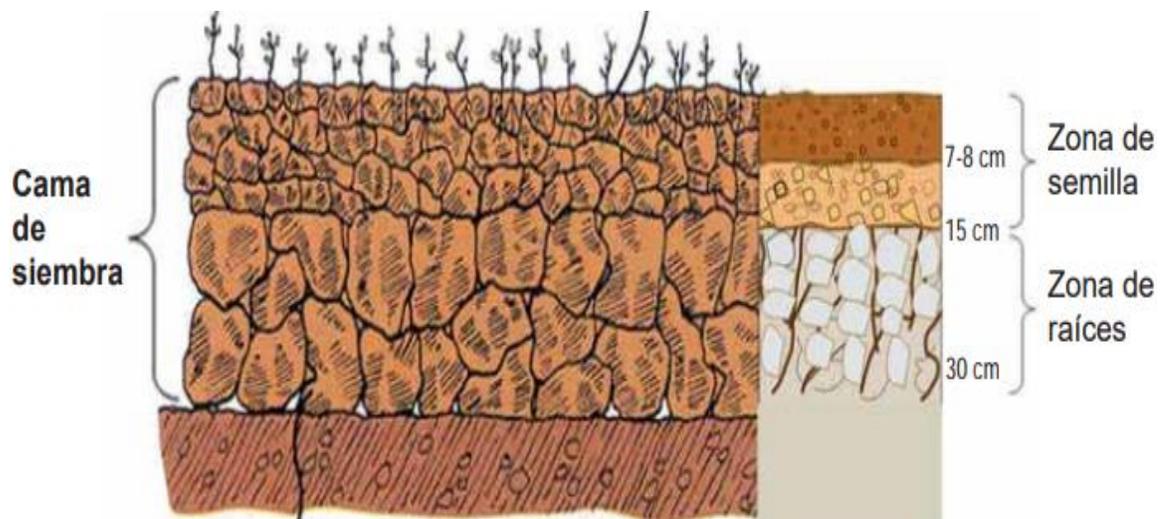


Figura 1. Profundidad de colocación de semilla y alcance de raíces. Fuente: Inostroza, J (2009).

2.8. Uso de la tecnología fotogramétrica

La tecnología ha desarrollado herramientas capaces de ser más eficientes y precisas que los sentidos del ser humano, es el caso de la vista, donde el ojo ha sido reemplazado por la cámara fotográfica, la cual cuenta con aplicaciones específicas en diferentes ámbitos de la ciencia y tecnología. Con esta evolución surge el uso de vehículos de mediana altura, tiene consigo ventajas en la recolección de información, este es el Vehículo Aéreo No Tripulado (VANT) o también conocido como dron; esta máquina ejecuta misiones remotas de reconocimiento y obtención de datos a través de imágenes, videos, o sensores, para fines como reconocimientos de patrones terrestres, medición remota de propiedades o algunas variables de interés que existe sobre la superficie (Flores, 2016).

La fotogrametría es una técnica con la que se obtiene y determina propiedades geométricas de los objetos a partir de imágenes fotográficas, para ello es necesario un solapamiento de varias fotografías, una solo permite información bidimensional, con el uso de dos o más, nos permite tener una visión estereoscópica y hacer mediciones tridimensionales (Aerosar, s.f.). Este autor presenta los siguientes productos que se pueden obtener a partir de la fotogrametría:

- Nube de puntos: es de las primeras opciones para representar un objeto en tres dimensiones, donde se genera un sistema de coordenadas tridimensional en el que se coloca un punto en el espacio, con coordenadas X, Y y Z, repitiéndose esta operación una gran cantidad de ocasiones (densificación), la nube de puntos es la base para otros procesos de representación tridimensional; el uso de drones permite obtener datos de objetos pequeños, edificaciones o grandes extensiones de terreno.
- Modelo Digital de Terreno: se deriva de la nube de puntos, es un conjunto de datos numéricos distribuidos en una malla de paso uniforme que representa una cierta magnitud física. El caso más conocido es el Modelo de Elevación Digital (MED, o DEM por sus siglas en inglés). La malla representa la superficie terrestre y cada punto de esta brinda la elevación del terreno en ese lugar. Del DEM existe dos variantes, el Modelo Digital de Terreno (MDT) y el Modelo Digital de Superficie (MDS); la diferencia está en que el MDT representa solamente la superficie sin objetos, mientras el MDS incluye todo objeto sobre la superficie como árboles,

ediciones, entre otros. La aplicación de los DEM's es muy amplia, desde la creación de mapas de relieve, generación de perfiles topográficos, análisis de superficies, sistemas de información geográfica, análisis de superficies y terrenos, agricultura de precisión, hasta estudios geológicos y arquitectura.

- Malla 3D: se obtiene a partir de la nube de puntos, donde estos se unen para formar caras planas triangulares y todas estas conforman la superficie del objeto en estudio. A estas caras se les añade una textura que se obtiene con las fotografías reales.

La cartografía en formato de papel con curvas de nivel ha sido el elemento más utilizado a lo largo de los años para representar la topografía del terreno, sin embargo, esta técnica exige complicados cálculos que requieren gran esfuerzo de trabajo y tiempo. Es por ello por lo que surgió la necesidad de realizar estudios del terreno con mayor facilidad, por lo que se desarrolló una nueva forma de representar el relieve, los Modelos Digitales de Terreno (MDT) (López, Montero, & Hernández, 2010).

Los mismos autores mencionan que, en la ingeniería agrícola existe la necesidad de realizar estudios que permitan predecir el comportamiento de los sistemas hidrológicos con el fin de cubrir las demandas hídricas de cultivos, por lo que los MDT son una herramienta importante para realizar dichas predicciones, ya que la gestión de la hidrología agrícola es fundamental para la sostenibilidad de los recursos agua y suelo.

Adicionalmente, los Modelos de Elevación Digitales (DEM) son construidos con base en datos de una fuente fiable preferiblemente, a partir de estos depende la precisión y calidad de los resultados. Los datos son la materia prima de los o MDT's, y pueden proceder del mapa topográfico, la fuente puede ser versión digital, de forma analógica, o bien por restitución fotogramétrica mediante pares de fotografías aéreas del terreno o modelizar.

2.9. Software Agisoft

Agisoft PhotoScan es un software de escritorio en el cual se procesan imágenes digitales, por medio de la combinación de técnicas de fotogrametría digital y visión por computadora, se genera una reconstrucción 3D del entorno. La versión profesional de este programa permite tener resultados como ortofotos georeferenciadas de alta resolución y modelos digitales de terrenos con gran calidad de detalles; además, presenta funcionalidades adicionales, entre ellas: clasificación de objetos, medición de distancias, áreas y volúmenes, soporte para puntos de control, procesamiento de imágenes satelitales, definición de sistemas de coordenadas geográficas estándar, entre otros (Agisoft, 2014).

La construcción de los productos cartográficos en Agisoft comienza a partir de una secuencia de pasos en cascada, hasta llegar a la construcción de un ortomosaico y otros productos derivados (nube de puntos, ortomosaicos, DEM, modelos 3D). A continuación, se presenta los pasos a seguir para llevar a cabo el procedimiento de cada producto, tal y como describe en el sitio web GIS&Beers, publicado en el año 2016:

- 1- Agisoft realiza una alineación de las imágenes con el fin de buscar puntos espaciales coincidentes por el solapamiento de las imágenes. Con esto se crea una nube de puntos.
- 2- A partir del primer punto se puede crear una nube de puntos densa, la cual comienza a reconstruir el modelo de una manera similar a la realidad. Estos puntos se presentan en valores RGB, por lo que se puede apreciar con cierta nitidez la zona de estudio.
- 3- Posteriormente se construye diferentes Modelos Digitales de Terreno, esto para lograr un soporte en los trabajos. Además, se pueden crear mallas, modelos de texturas, DEM; adicionalmente, existe la opción de reconstrucción del modelo sustituyendo la nube de puntos por una malla continua basada en resoluciones de pixel apropiados.

Se pueden colocar puntos de control tomados en campo, con el fin de incorporarlos para precisar un mosaico o georeferenciarlo si no se dispone de coordenadas GPS iniciales de distribución de las imágenes aéreas. Agisoft PhotoScan permite trabajar con diferentes sistemas de proyección.

2.10. Precipitación en la agricultura

Según la agricultura es una actividad estrechamente relacionada con el clima; la cantidad de agua de lluvia, la humedad almacenada en el suelo, entre otros; son algunos componentes del clima que con frecuencia repercuten en la producción de cosechas. Esto genera que la información del estado del tiempo sea fundamental para la toma de decisiones en la agricultura moderna (Medina, Grageda, Ruiz & Báez, 2008).

Con respecto a la precipitación, según Meliá (1991), es la principal fuente de reservas de humedad del suelo y a su vez es fuente importante de agua para las plantas. La precipitación se caracteriza por la cantidad de agua caída por unidad de tiempo y se mide por la altura de la capa de agua que se habría formado si se evitara la evapotranspiración y la escorrentía; tanto la cantidad total como la intensidad de la precipitación son importantes en la agricultura. La lluvia intensa produce mayor escorrentía, además puede originar erosión en el suelo y en casos de gravedad hasta deslizamientos de tierra.

La precipitación se mide en términos de la altura de lámina de agua y se expresa normalmente en milímetros. Los equipos de medición se basan en la exposición a la intemperie de un recipiente cilíndrico abierto en la parte superior, donde se recoge el agua producto de la lluvia y se registra la altura; estos aparatos se clasifican de acuerdo con el registro de las precipitaciones en pluviómetros y pluviógrafos (Villón, 2004).

Según Reynolds (2017), un pluviómetro es un instrumento que mide la cantidad de lluvia que cae en un periodo de tiempo determinado, los datos se pueden leer manualmente o por estación meteorológica automática. Esta información es utilizada por profesionales de distintas áreas, por ejemplo, meteorólogos, hidrólogos, ingenieros. En la agricultura se utiliza este equipo con el fin de analizar los datos actuales con otros anteriores y tomar decisiones sobre cómo afectará el suministro del agua y la vida de las plantas.

3. METODOLOGÍA

En la Figura 2 se muestra el área de estudio en el cual se desarrolló el estudio, esta se encuentra en San Rafael de Irazú, Pacayas, Cartago; propiedad de la empresa Suelo Fértil S.A. El terreno utilizado tiene un área de 1,35 ha; es utilizado para la agricultura; sin embargo, previamente a este trabajo estaba dedicado a la ganadería con pasto de la variedad "Ryegrass".

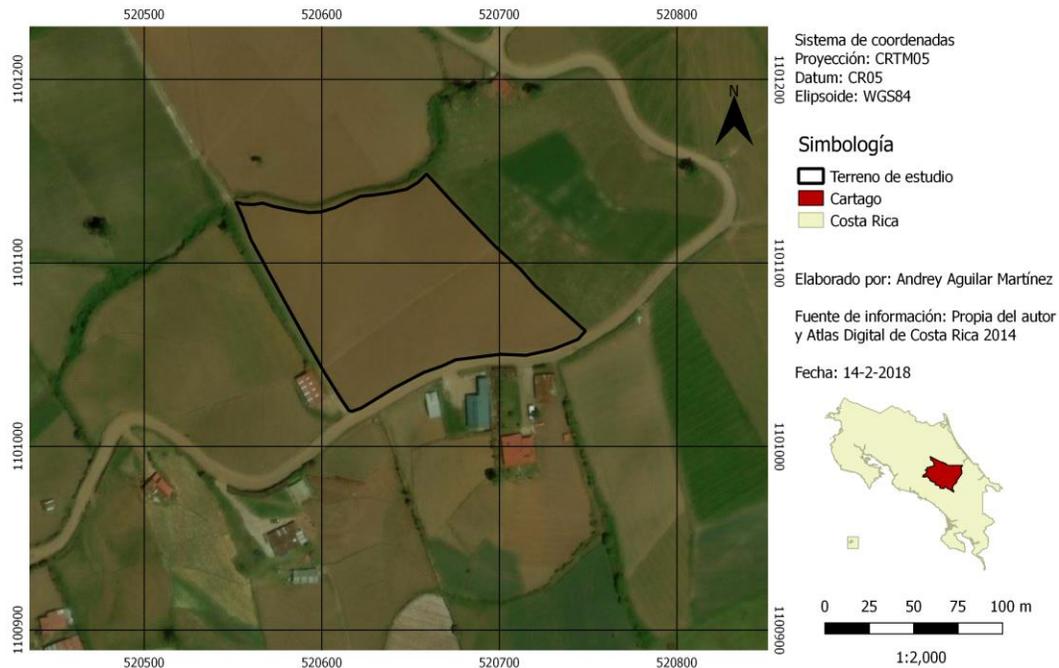


Figura 2. Ubicación del área de estudio.

3.1. MATERIALES

3.1.1. Análisis de comportamiento según mecanización realizada:

- Tractor Landini, serie 5H, 105 Hp (figura 1)
- Tractor Sonalika, modelo Worldtrac, 90 Hp
- Implementos:
 - Rotador
 - Arado de cinceles
 - Palín
- Penetrómetro, marca DICKEY-john, rango medición de presión de 0 a 600 psi
- GPS, marca Garmin

3.1.2. Modelos de Elevación Digital y comprobación con pedestales en el campo:

- Dron, marca DJI, modelo Mavic Pro, cámara de 12,3 megapíxeles,
- Aplicación Altizure para Smartphone Android
- Software Agisoft, versión 1.4.1
- Software Quantum GIS, versión "Las Palmas" 2.18.16
- Estación Total, marca Gowin, modelo TKS-202
- Estación RTK, marca Leica, modelo GS14
- Software Surfer, versión 10.7.972
- GPS
- Cilindros metálicos
- Barreno
- Tubos de PVC
- Regla

3.1.3. Correlación entre precipitación y variación en topografía del suelo:

- Pluviómetro, marca Hobo
- Microsoft Office Excel 2016

3.2. PROCEDIMIENTO

El presente proyecto se realizó en un espacio temporal entre el mes de enero al mes de marzo del año 2018, dicho lapso contempló desde la instalación de los puntos de control sobre el área de estudio hasta el último vuelo realizado con el dron.

La primera etapa del proyecto consistió en realizar el levantamiento topográfico con la Estación Total propiedad de la Escuela de Ingeniería Agrícola del Tecnológico de Costa Rica, este trabajo se llevó a cabo con el fin de confeccionar la representación gráfica del perfil topográfico, los datos se procesaron en el software Excel 2016 y posteriormente en Surfer donde se realizó el modelado del terreno presente en el área de estudio y el cual es con el que se trabajó en el proyecto, además de determinar un plano de coordenadas propio, el cual funcionaría para posteriores actividades dentro del mismo trabajo.

La segunda acción fue en campo, en el cual se realizó un muestreo de suelo con el fin de realizar el análisis correspondiente de la textura presente en el terreno por medio del método de Bouyoucos, para determinar las proporciones de partículas se utilizó las ecuaciones 3, 4 y 5, además del triángulo de texturas (ver Anexo 1)

Luego, se realizó el levantamiento de los puntos de control en campo por medio de RTK (Real Time Kinematic, por sus siglas en inglés) propiedad del Tecnológico de Costa Rica. A partir de este trabajo se logró determinar las coordenadas Longitud, Latitud y Altura, para cada uno de los puntos que después fueron utilizados en el procesamiento de fotogrametría para ajustar las coordenadas del dron con las medidas en campo con dicho equipo de medición.

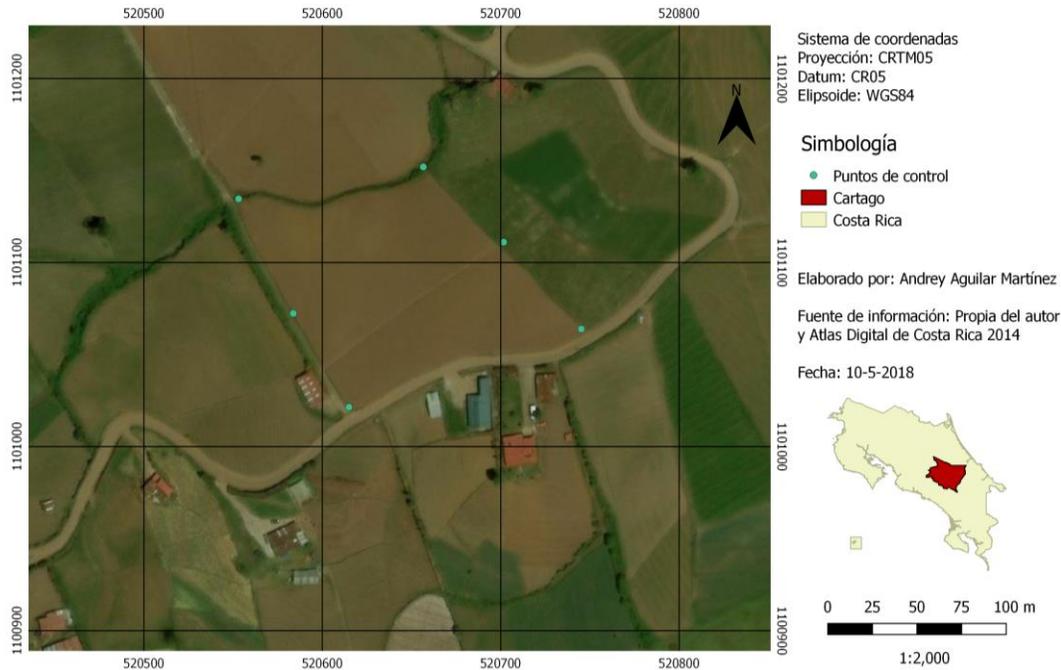


Figura 3. Puntos de control en el terreno para ajuste en fotogrametría.

Posteriormente, se establecieron puntos dentro del terreno georeferenciados con GPS, y en cada uno se utilizó el penetrómetro para medir la compactación del suelo, la primera medición se hizo a la máxima profundidad que el instrumento lograra penetrar, ya que el suelo se encontraba compactado debido a que el terreno en estudio se mantuvo durante tres años con pasto para el ganado lechero, debido a que el propietario realiza rotación de potreros para descansar y recuperar la calidad del suelo, gracias a que se logra fertilizar el suelo con el estiércol del ganado, aumentar fortaleza en estructura del suelo, entre otras ventajas. Estos puntos se establecieron bajo un criterio visual del terreno, colocando un punto en distintas zonas del terreno, especialmente donde existía cambio de pendiente con el fin de tener datos en zonas bajas, altas e intermedias.

Concluida la anterior medición, se llevó a cabo la preparación del terreno por medio de mecanización, el primer implemento utilizado fue el arado rotativo o rotador, el cual cumplió la función de despedazar el pasto y sus raíces; una vez que el tractor mecanizó cada punto de medición de resistencia a la penetración se realizó nuevamente la misma, a una profundidad de 40 cm, ya que la preparación se hizo con el fin de posteriormente cultivar papa y sus raíces se encuentran principalmente a dicha distancia por debajo del nivel del suelo.

El segundo implemento agrícola utilizado fue el arado de cinceles, este se utilizó para aflojar el suelo a una profundidad alrededor de 45 cm, esto permite que las raíces del cultivo puedan crecer sin problema de una estructura rígida del suelo, además facilitó la circulación del agua y así evitar tener erosión hídrica y con esto pérdida de suelo con gran fertilidad, de igual forma fue necesario para lograr presencia de aire luego de años de estar compactado.

La labor se realizó al mismo tiempo que el arado rotador, solamente existió un espacio de 30 minutos en el paso de un implemento sobre el mismo punto, esto para lograr medir la compactación del suelo después que pasaba el arado rotador, además para lograr un mejor trabajo de ambos tractores. Posterior se midió la resistencia a la penetración del suelo en cada punto para lograr notar las diferencias de valores que se lograba medir con el penetrómetro.

La preparación del suelo se reanudó una semana después debido a condiciones climáticas del lugar; para lograr evaluar de mejor manera cómo influye un implemento determinado en el comportamiento del suelo en un periodo de tiempo, se utilizaron dos implementos diferentes (Figura 4), en un sector se mecanizó con arado de cinceles y la otra parte con arado excavador o también llamado palín, también propiedad del señor José Rafael Aguilar.

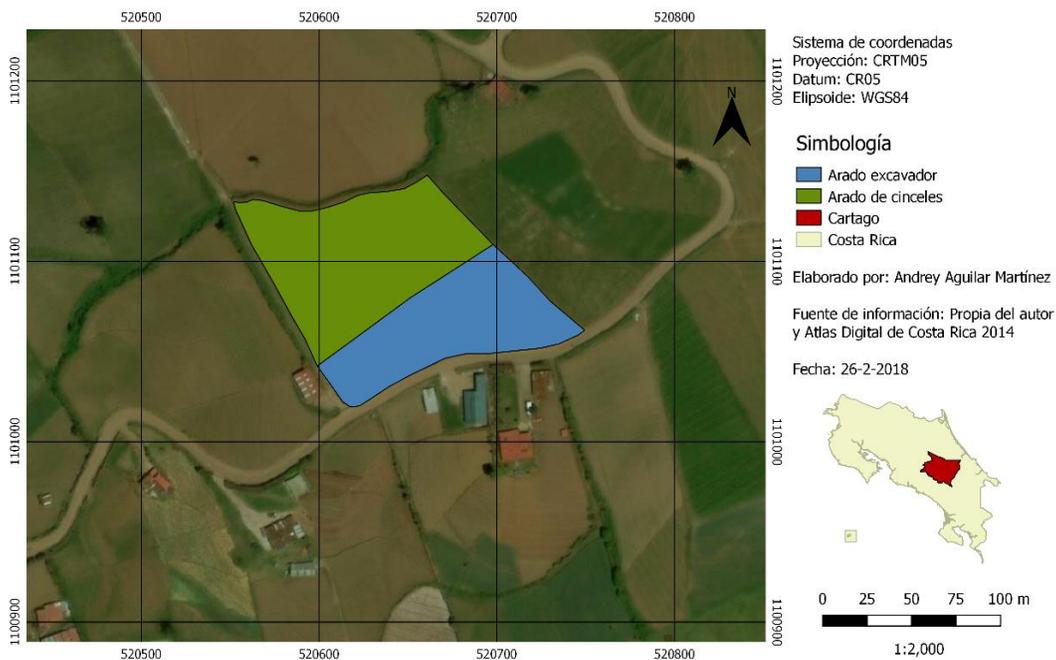


Figura 4. Área cubierta por cada implemento. Fuente: propia del autor.

El día 26 febrero de 2018 se comenzó la conformación de los surcos por medio de un arado metálico aprovechando la tracción animal para poder colocar la semilla de papa en su respectivo lugar, finalizado la preparación de estos se procedió a medir una vez más la resistencia del suelo a la penetración, con el fin de medir los valores de acuerdo con el implemento utilizado en cada zona.

Para conocer la ubicación del suelo presente en el terreno con respecto a los suelos que se tienen en Costa Rica, se utilizó el geoportal de suelos de Costa Rica actualizado en noviembre del año 2017, esto para conocer el Orden de suelo en el que se encontraba el terreno en estudio (Figuras 5 y 6).

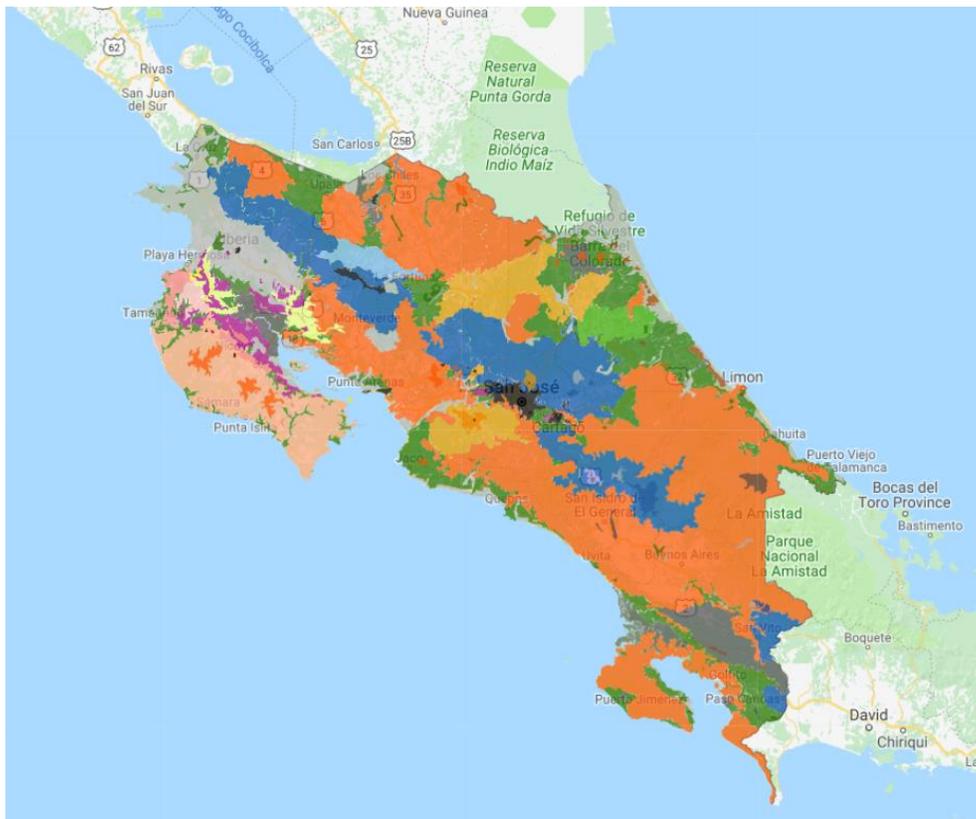


Figura 5. Visualización general del geoportal de suelos: Fuente: www.suelos.cr.



Figura 6. Geoportal de suelos sin capa seleccionada. Fuente: www.suelos.cr.

Lo anterior fue el procedimiento para el análisis del comportamiento del suelo según el tipo de mecanización. Simultáneamente a las mediciones de compactación se realizaron vuelos autónomos con el dron Mavic Pro para evaluar el movimiento del suelo debido a las distintas labores de preparación del terreno para lograr sembrar con las mejores condiciones posibles del suelo, estos vuelos fueron programados con la aplicación Altizure.

En la Figura 7 se observa la pantalla de preparación del vuelo programado en la aplicación mencionada, todos los vuelos realizados se hicieron a una altura de 50 metros con referencia a una base instalada en la cercanía de la bodega de la finca, el polígono para lograr cubrir el área del proyecto es de forma rectangular, por lo que era necesario tener que abarcar mayor área, ya que el terreno no tiene forma geométrica definida. Los vuelos se completaron en 10 minutos.

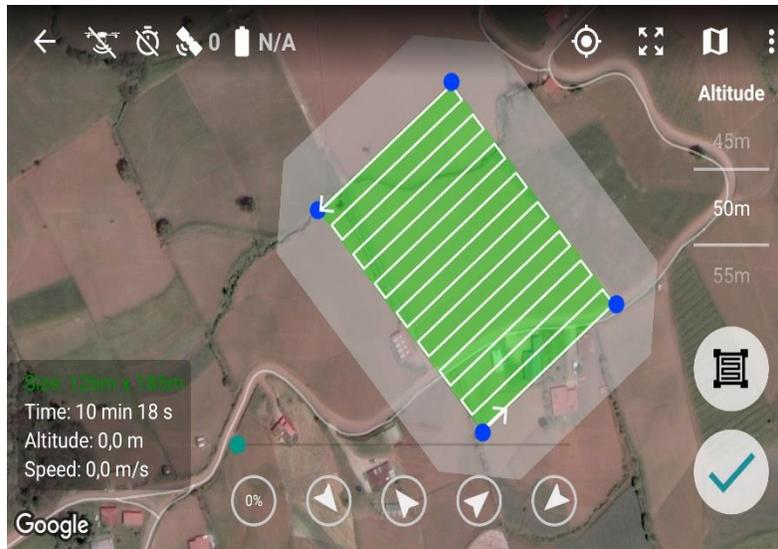


Figura 7. Programación de vuelo automático de dron.

Las imágenes capturadas durante los vuelos se procesaron en el software Agisoft, primero se importaba la carpeta con las imágenes, se debía eliminar imágenes borrosas, algunas que captaran prácticamente la misma área, esto para alivianar los procesos de la computadora, en seguida se alineaban las imágenes con el fin de crear la nube de puntos dispersa, se seleccionó una exactitud media para todos los vuelos, esto debido a que se requería de una computadora de mayor capacidad para lograr hacer los procesos en alta calidad. La Figura 8 muestra la pantalla que permite realizar el procedimiento para crear la primera nube de puntos.

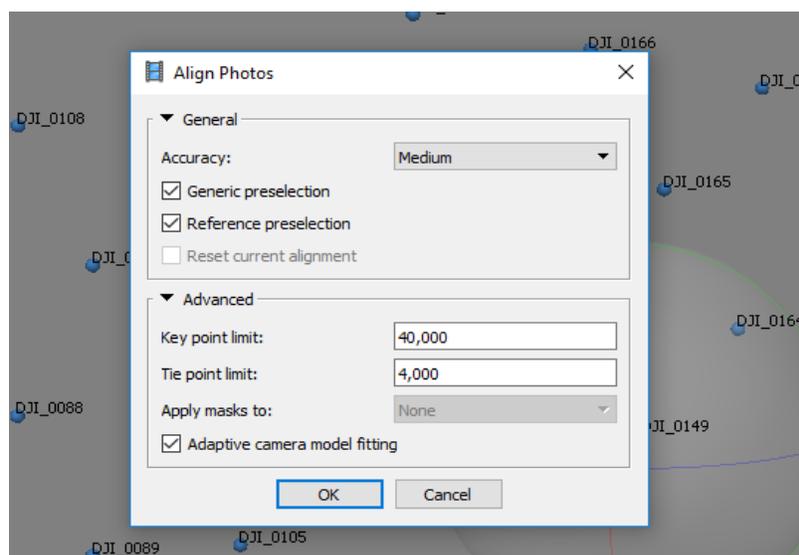


Figura 8. Alinear imágenes en Agisoft para creación de nube de puntos dispersa.

El resultado de la nube de puntos se debía revisar para eliminar puntos perdidos espacialmente, ya que estos generan errores mayores en la nube de puntos densa, se prosiguió a crear dicha nube, de calidad media y los demás parámetros se conservaron por defecto. En la Figura 9 se observa la ventana que despliega el programa para la creación de la nube de puntos densa a partir de la dispersa.

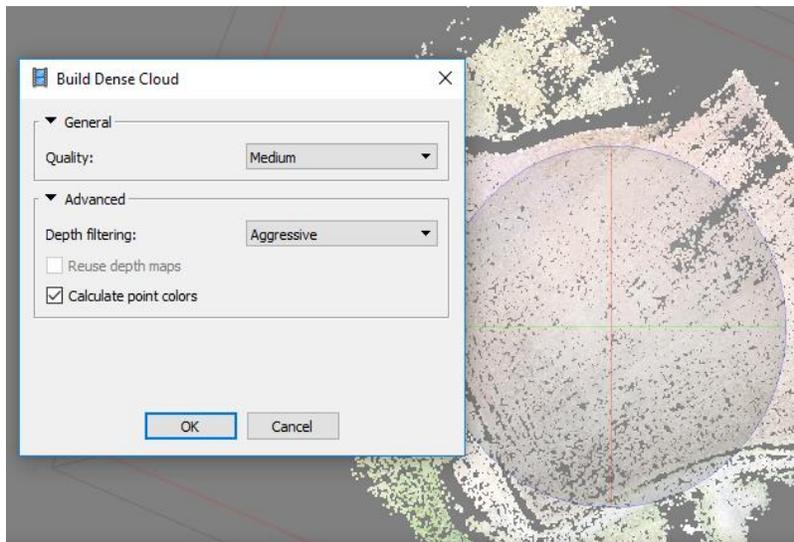


Figura 9. Construcción de nube de puntos densa.

Como se observa en la Figura 10, las marcas utilizadas fueron cuadros de cartón con una cinta adhesiva negra, colocados sobre postes de madera fijos para lograr distinguir los puntos de control que fueron medidos con la Estación Total y con esto fueran captados fácilmente durante los vuelos del dron, así como en Agisoft, ya que estos puntos se colocaron como marcadores para lograr georeferenciar el modelo de puntos creados anteriormente.



Figura 10. Puntos de control en campo.

Para lograr obtener un producto con una superficie sólida se debe construir una malla, se hizo a partir de la nube densa para lograr un acabado de mejor calidad. En la opción avanzada se dejó habilitada la interpolación (Figura 11). Para este procedimiento se revisó nuevamente el modelo de la nube de puntos densa, ya que puntos mal ubicados en el espacio pueden generar una malla con datos equivocados que no representaban la realidad del terreno.

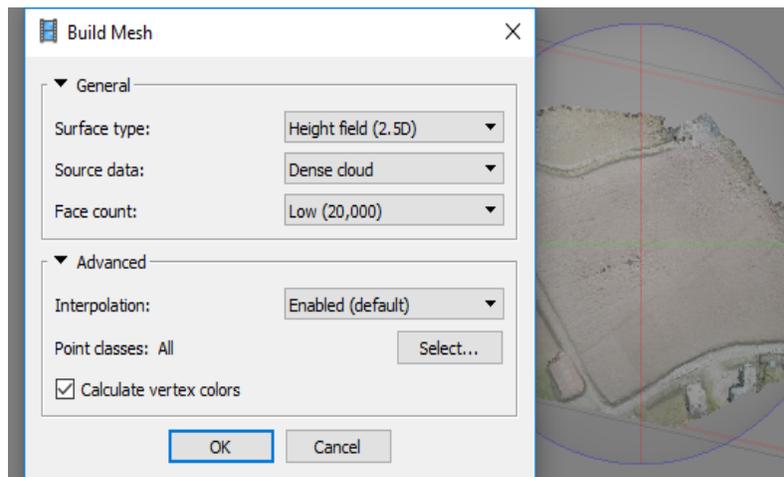


Figura 11. Creación de malla.

Seguidamente, se creó el Modelo de Elevación Digital (DEM), para ello se escogió la proyección del modelo, así como la fuente de información que fue la malla (Figura 12). Al realizar esto se tuvo que exportar el DEM en formato TIFF, con el fin de ejecutarlo en Quantum Gis para analizarlo.

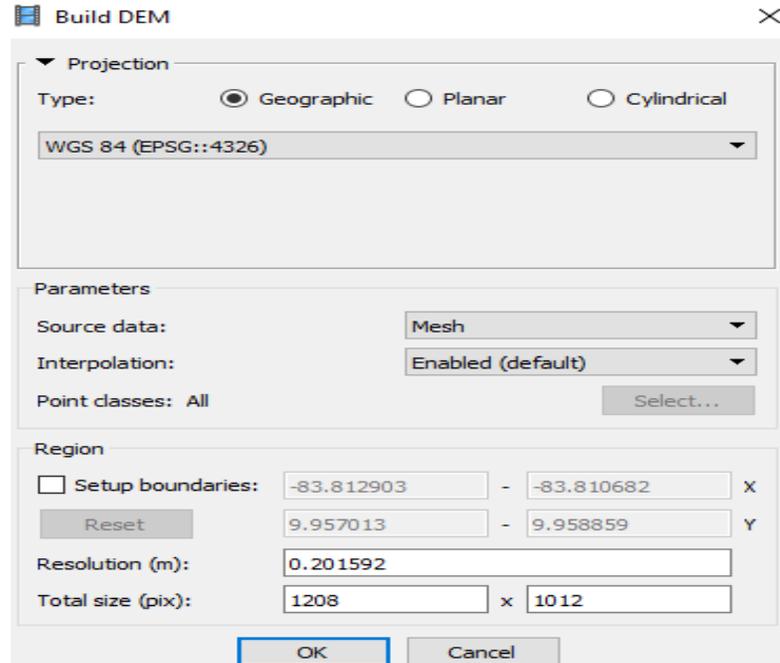


Figura 12. Ventana de creación de DEM.

Los días que se realizaron vuelos con el dron se tomó muestras de suelo para determinar la densidad aparente en ese momento, así poder medir la variación del espacio poroso a través del tiempo. Esta labor se realizó de acuerdo con el procedimiento mencionado en la sección de Revisión Bibliográfica, y se calculó la densidad aparente por medio de la ecuación 1.

$$Da = \frac{Ps}{Vol} \quad (1)$$

Donde:

Da: densidad aparente (g/cm³)

Ps: peso seco (g)

Vol: volumen total del cilindro (cm³)

Por último, para determinar los cambios en el nivel de suelo en campo se analizaron los puntos utilizados para medir resistencia a la compactación, en los mismos puntos se colocaron tubos de 50 cm de altura, de PVC de una pulgada con una marca de cinta adhesiva que indicaban el nivel de referencia en el que se encontraba el suelo en ese instante, esto para lograr observar la variación del suelo con respecto a dicha marca.

La pérdida de suelo por hectárea se calcula con la ecuación 2.

$$P = 10000 * Dv * Da \quad (2)$$

Donde:

P: pérdida de suelo (ton/ha)

Dv: espesor promedio de suelo perdido (m)

Da: densidad aparente del suelo (ton/m³)

Luego se estima el periodo de tiempo durante el cual ocurrió la erosión para poder calcular la tasa de erosión en ton/ha/año.

Para el comportamiento del suelo por medio de la fotogrametría se midió por medio de los Modelos de Elevación Digital realizados, donde en el QGIS se interpuso la capa vectorial de los puntos de medición de resistencia a la penetración y seleccionando la capa ráster de cada fecha de vuelo se identificó el valor de la altura en ese preciso punto, posteriormente se compararon los valores obtenidos en campo con los de fotogrametría.

Con respecto al procedimiento para conocer la correlación existente entre la precipitación y la variación en el movimiento del suelo, se usó un pluviómetro marca Hobo. La recolección de datos se llevó a cabo personalmente en el sitio, donde se conectaba la tarjeta del pluviómetro a la computadora a través de un cable USB especial para instrumento, los datos se guardaban en formato CSV para posteriormente manipularlos en Excel 2016, en este programa se separó la precipitación del lugar en lapsos entre cada vuelo de dron realizado.

4. RESULTADOS Y DISCUSIÓN DE RESULTADOS

A continuación, se presentan los resultados obtenidos durante el proyecto realizado en la zona norte de Cartago:

El primer resultado obtenido con datos recolectados fue el plano del levantamiento topográfico, el cual se realizó con el programa Surfer versión 10, como se mencionó en la sección de Procedimiento. En la Figura 13 se observa el comportamiento de la topografía, donde aumenta la altura del terreno en dos pendientes distintas, de norte a sur 9,1% y de este a oeste 12,3%; la escala de colores permite apreciar de mejor forma los cambios en la pendiente captados con la Estación Total (Figura 14).

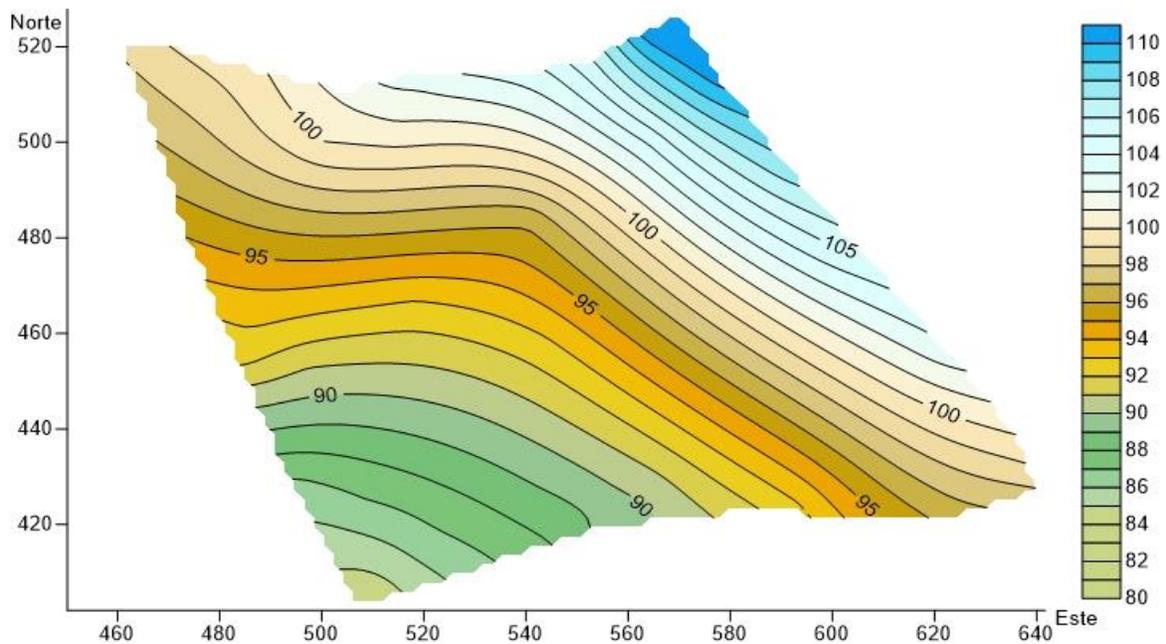


Figura 13. Mapa del levantamiento topográfico. Fuente: propia del autor.



Figura 14. Levantamiento topográfico con Estación Total.

En la Figura 15 se localizan los dos puntos de muestreo de campo con el fin de determinar la textura del suelo presente en el terreno. Además, los resultados de textura obtenidos a partir de los datos de laboratorio (ver Anexo 1), por medio del método de Bouyoucos, los que se presentan en el Cuadro 6, las dos muestras recolectadas y analizadas son de textura Franco Arenoso.

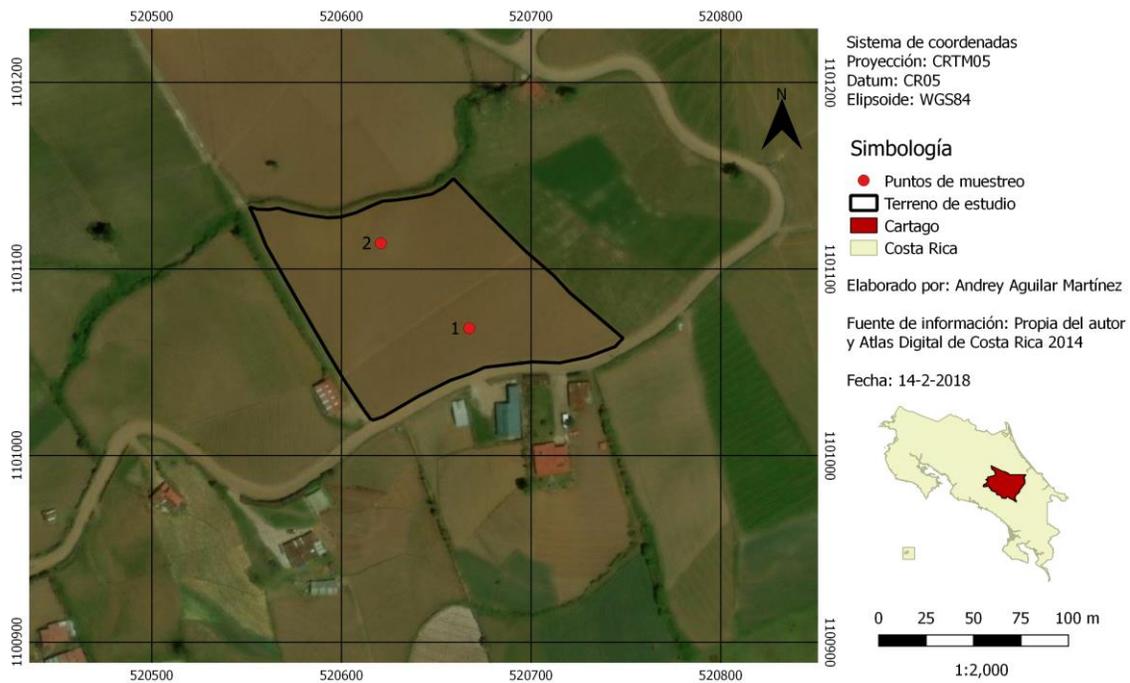


Figura 15. Puntos de muestreo para textura del suelo. Fuente: propia del autor.

Cuadro 1. Porcentaje de partículas en cada muestra de suelo.

Muestra	Sub muestra	% Arena	% Arcilla	% Limo	Textura
1	1.1	51.3	14.38	34.32	Franco
	1.2	50.05	14.38	35.56	
2	2.1	50.92	12.88	36.2	Arenoso
	2.2	51.68	12.57	35.75	

Por otra parte, los puntos georeferenciados se colocaron al azar sobre el área en estudio, asegurando que se cubriera por completo todas las zonas del terreno para tener mejor representatividad de los datos. Como se observa en la Figura 16, diez puntos fueron los utilizados, en los cuales se midió la resistencia a la penetración para lograr analizar cómo influye el tipo de mecanización en el comportamiento del suelo. Además, se muestra en la Figura 17 la colocación del penetrómetro antes de mecanizar el terreno, y en la Figura 18 cómo se realizó la medición con dicho instrumento.

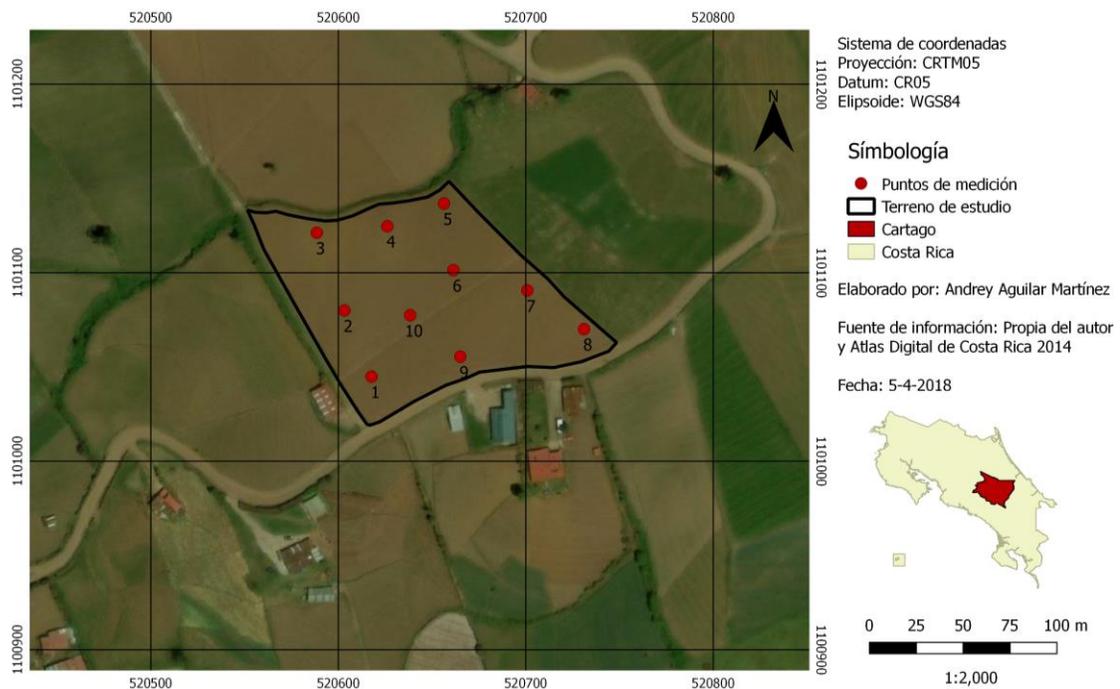


Figura 16. Puntos en campo de medición de resistencia a la penetración. Fuente: propia del autor.



Figura 17. Medición con penetrómetro antes de mecanizar.



Figura 18. Utilización de penetrómetro en campo.

La preparación del terreno se comenzó con el rotador de la marca Maschio, con un tractor Sonalika, modelo Worldtrac de 90 Hp el cual fue operado por el señor Milton Aguilar, operador de tractor con más de 20 años de experiencia, (Figuras 19 y 20). Esta labor se realizó durante las fechas 3 de febrero y 4 de febrero del año 2018, por motivos de condiciones de precipitación que impidieron finalizar en un solo día.



Figura 19. Mecanización con arado rotativo, 3 de febrero de 2018.



Figura 20. Mecanización con arado rotativo, 4 de febrero de 2018.

El arado de cinceles de la marca Nardi es de 9 puntas (Figura 21), de la empresa Suelo Fértil S.A., cuyo propietario es el señor José Rafael Aguilar Gómez, dicho implemento se operó mediante un tractor Landini de 105 Hp, serie 5H. Con este apero únicamente se trabajó el día 4 de febrero.



Figura 21. Mecanización con arado de cinceles, 4 de febrero de 2018.

Como se mencionó en la sección de Procedimiento, la labor de mecanización con arado rotador y de cinceles se realizó simultáneamente las labores, específicamente el día 4 de febrero de 2018; en las Figuras 22 y 23 se observa dicho proceso de mecanización.



Figura 22. Preparación del suelo con rotador y arado de cinceles.



Figura 23. Vista aérea de ambos tractores mecanizando.

El arado excavador utilizado es de la marca Selvatici, serie 150-95 (Figura 24), también propiedad del dueño de la finca. Este implemento se utilizó en un área de 0,56 ha, y el arado de cinceles en un área de 0,79 ha, como se mostró en la figura 2 de la sección de Procedimiento.



Figura 24. Arado excavador, también conocido como palín.

La primera medición de compactación se realizó a la máxima profundidad posible que se incrustara el penetrómetro, ya que el suelo se encontraba altamente compactado, las profundidades fueron aproximadamente a 5 cm. Las demás mediciones se realizaron a 20 cm y 40 cm de profundidad. En el Cuadro 2, se presenta los resultados de las mediciones realizadas de resistencia a la penetración a 20 cm. La primera columna indica el punto en campo en el que se hizo la medición, para este proyecto se colocaron 10 puntos distribuidos espacialmente; las columnas donde se indican valores de MPa se refieren a las fechas en las que se realizó cada medición.

Cuadro 2. Valores de resistencia a la penetración a 20 cm de profundidad.

Punto	#1 (MPa) 2-2-18	#2 (MPa) 5-2-18	#3 (MPa) 15-2-18	#4 (MPa) 19-2-18	#5 (MPa) 28-2-18	#6 (MPa) 17-3-18	#7 (MPa) 31-3-18	Implemento
1	1,896	0,862	0,862	0,689	0,517	0,345	0,345	Palín
2	1,379	0,689	0,517	0,517	0,517	0,689	0,345	Cinceles
3	1,896	0,689	0,689	0,517	0,517	0,517	0,517	Cinceles
4	1,379	0,689	0,689	0,517	0,517	0,517	0,345	Cinceles
5	1,896	0,862	0,689	0,862	0,517	0,689	0,689	Cinceles
6	1,724	0,689	0,517	0,862	0,689	0,345	1,207	Cinceles
7	1,896	0,862	0,517	0,689	0,689	0,689	0,862	Palín
8	2,068	0,689	0,517	0,862	0,517	0,345	0,862	Palín
9	1,724	0,517	0,345	0,862	0,689	0,345	0,689	Palín
10	2,068	0,345	0,517	0,862	0,689	0,345	1,034	Cinceles

En la última columna del cuadro se menciona el implemento utilizado una vez que se hizo, después de haber mecanizado con arado rotador y de cinceles, ya que como se mencionó anteriormente, la tercera parte de la preparación fue dividir el área en dos secciones, una con arado de cinceles y la otra con palín.

En la Figura 25, se representa el comportamiento de los valores de resistencia a la penetración, donde se observa de manera general que en la segunda y tercera medición los valores se mantienen mayormente constantes, luego en la cuarta y quinta medición los puntos 2, 3 y 4 no presentan variaciones, mientras los demás puntos tienen diferencias significativas. Además, los

datos descenden conforme avanza el tiempo, y en la última medición, ocho de las 10 muestras aumentan la compactación, esto se debe a que conforme pasan los días el suelo tiende a recuperar su posición inicial y además el personal está constantemente apelmazando el suelo debido a labores que requiere el cultivo.

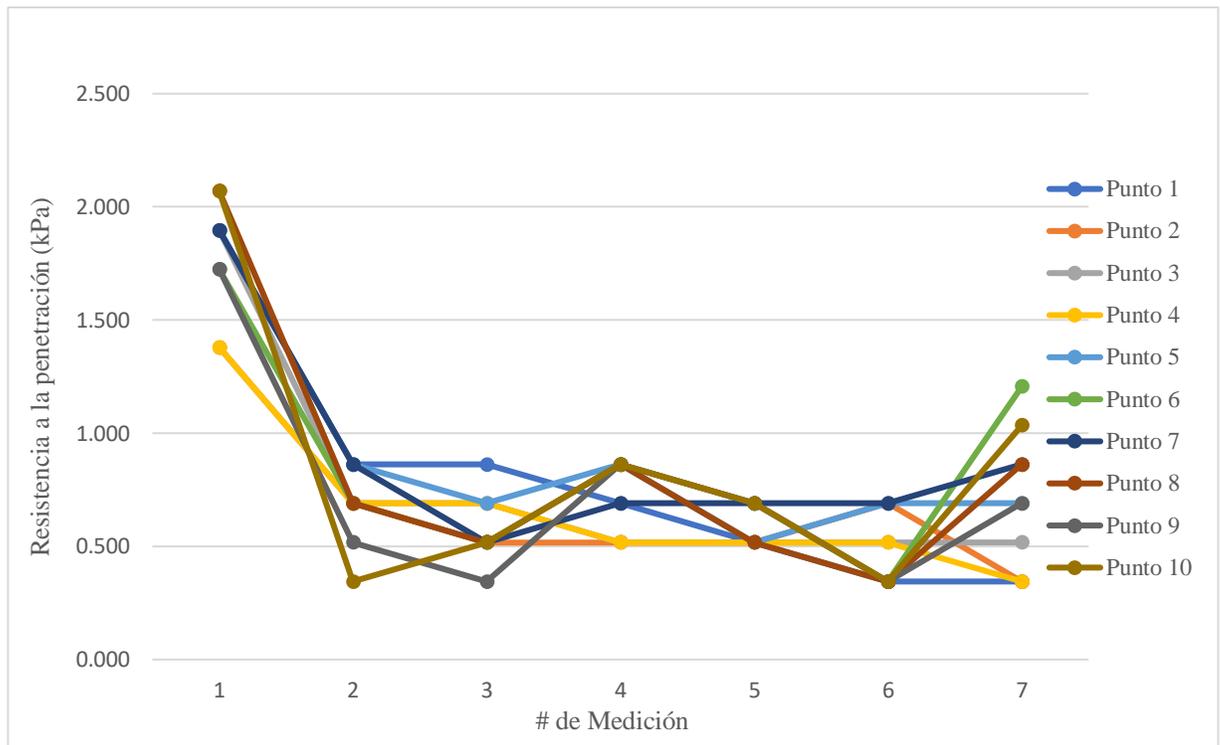


Figura 25. Comportamiento de los valores de resistencia a la penetración a 20 cm. Fuente: propia del autor.

De igual forma se midió esta variable a los 40 cm de profundidad (Cuadro 3), los resultados presentan variación con respecto a los medidos a 20 cm, ya que como se observa la resistencia a la penetración es mayor en la mayor parte de los puntos y en la secuencia de las mediciones, esto porque el suelo a mayor profundidad queda menos disgregado y el efecto que realiza el implemento en la parte inferior es menor, además el suelo conforme aumenta en profundidad hay disminución de espacio poroso, por lo que las partículas del suelo tienden a acomodarse unas con las otras y esto va generando que el suelo se vaya compactando (Alvarado, 2004).

Cuadro 3. Mediciones de resistencia a la penetración a 40 cm de profundidad.

Punto	#1 (MPa) 2-2-18	#2 (MPa) 5-2-18	#3 (MPa) 15-2-18	#4 (MPa) 19-2-18	#5 (MPa) 28-2-18	#6 (MPa) 17-3-18	#7 (MPa) 31-3-18	Implemento
1	1,896	1,379	1,207	1,207	0,517	1,034	0,517	Palín
2	1,379	1,207	0,689	1,207	0,689	0,862	1,034	Cinceles
3	1,896	1,207	1,034	1,207	1,034	1,034	1,034	Cinceles
4	1,379	1,379	1,034	1,034	0,862	0,689	1,207	Cinceles
5	1,896	1,551	1,034	1,034	0,517	1,379	1,207	Cinceles
6	1,724	1,207	0,862	0,862	0,689	1,034	1,379	Cinceles
7	1,896	1,551	1,207	0,689	0,689	0,862	0,862	Palín
8	2,068	1,551	0,862	0,862	0,517	0,517	0,862	Palín
9	1,724	1,379	1,034	0,862	0,689	0,517	0,689	Palín
10	2,068	0,862	0,862	0,862	0,689	0,689	1,034	Cinceles

En la Figura 26 se muestra lo que se mencionó anteriormente, ya que los valores de la primera medición son por encima de los 1,300 MPa y luego descienden en todos los puntos para la segunda y continua su disminución para la tercera medición; posteriormente, en la cuarta medición en dos puntos se dio otra disminución en la resistencia a la penetración, el punto 7 pasó de 1,207 kPa a 0,689 MPa, es decir, descendió cerca de la mitad en esta variable, el punto 9 tuvo presentó un descenso más leve. Además, dos puntos fueron los que aumentaron su compactación, estos fueron el 2 y 3; los demás, permanecieron constantes. Al final de las mediciones, el 60% de los puntos tuvo un aumento de la resistencia a la penetración, el 20% se mantuvo igual con respecto a la medición inmediata anterior, y en el restante 20% se dio otra disminución de la compactación.

Teniendo como punto de comparación las mediciones en ambas profundidades, las mismas realizadas a 20 cm muestran menor resistencia a la compactación que las hechas a 40 cm, esto analizándose a partir de un mismo punto y el mismo día de medición. Además, en las dos profundidades se evidencia una clara disminución de la compactación una vez hechas las labores de preparación del suelo por medio de maquinaria agrícola, sin embargo, una vez establecido el cultivo de papa los valores se mantienen prácticamente constantes y con el pasar de los días existe el comportamiento de aumentar la resistencia a la compactación en gran porcentaje de las muestras.

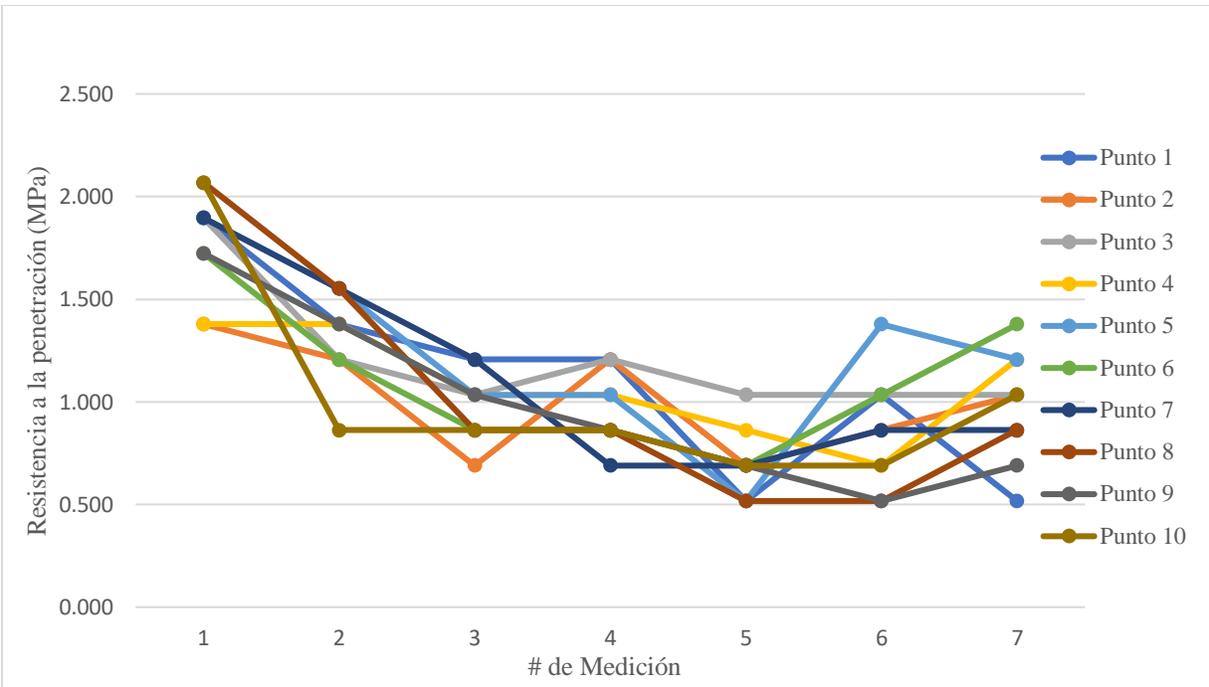


Figura 26. Comportamiento de los valores de resistencia a la penetración a 40 cm. Fuente: propia del autor.

Comparando los valores de resistencia a la penetración de acuerdo con cada implemento, los puntos donde se hizo la preparación con palín presenta menos compactación, esto analizando la última medición realizada durante el proyecto, lo anterior para ambas profundidades.

En el caso de las mediciones realizadas, solo se presentan valores críticos antes de la mecanización, ya que como se mencionó anteriormente, el suelo permaneció durante tres años como potrero y esto permitió la compactación que pudo ser medida para efectos de analizar el estado del terreno durante un periodo de estudio establecido.

Por otra parte, se realizaron pruebas de densidad aparente los mismos días de medición de resistencia a la penetración. Dos muestras de suelo en cada área de mecanización, puntos 1 y 2 en área de palín, 3 y 4 en área de arado de cinceles (Figura 27).

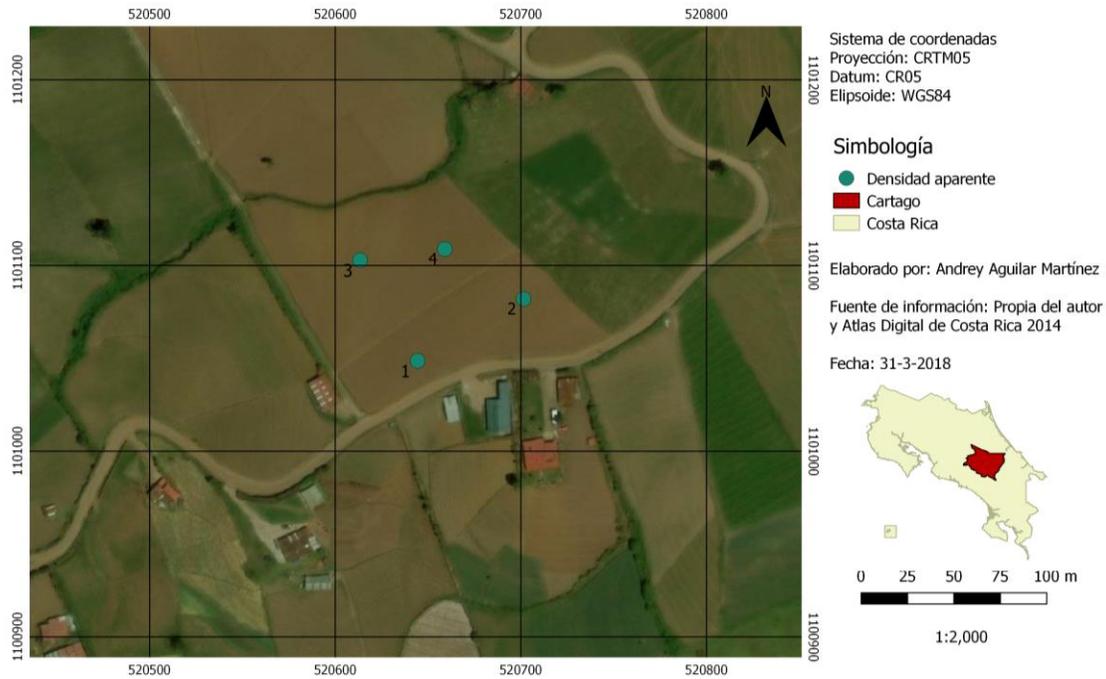


Figura 27. Puntos de muestreo de densidad aparente. Fuente: propia del autor.

En el Cuadro 4 están los resultados de las 24 muestras de densidad aparente recolectadas en campo, las primeras dos mediciones presentan valores cercanos a $1,00 \text{ g/cm}^3$, esto debido a que el suelo se encontraba compactado, en las demás mediciones los valores son cercanos a $0,85 \text{ g/cm}^3$. Se aprecia que la densidad aparente en las muestras 1 y 2 son inferiores a las 3 y 4, por lo que el palín genera una densidad aparente menor, existe mayor espacio poroso, mejor oxigenación en el suelo y esto les permite a las raíces desarrollarse de mejor forma.

Cuadro 4. Valores de densidad aparente.

Medición	Muestra	Peso seco (g)	Volumen (cm ³)	Da (g/cm ³)
1	1	209,6	205,8874	1,0180
	2	211,3	205,8874	1,0263
	3	217,9	209,0534	1,0423
	4	205,8	205,8874	0,9996
2	1	203,5	202,6704	1,0040
	2	201,5	202,6704	0,9942
	3	210,7	209,0534	1,0079
	4	208,1	205,8874	1,0107
3	1	164	202,6704	0,8092
	2	172,3	209,0534	0,8242
	3	192,1	218,9564	0,8773
	4	188,5	215,5352	0,8746
4	1	177,2	205,8874	0,8607
	2	173,8	202,6704	0,8575
	3	180,5	215,5352	0,8374
	4	186,2	209,0534	0,8906
5	1	185,1	218,9564	0,8453
	2	169,8	205,8874	0,82472
	3	185,9	218,9564	0,84902
	4	192,8	218,9564	0,88054
6	1	174,2	218,9564	0,8413
	2	179,8	215,5352	0,8342
	3	192,2	215,5352	0,8917
	4	180,9	205,8874	0,87863

Un estudio realizado por Alvarado & Forsythe (2005), el ámbito de variación de la densidad aparente encontrado en la estudio indica valores entre 0,55 y 1,46 g/cm³ de 0 a 1 m de profundidad, en suelos andisoles, considerando los promedios para cada intervalo de profundidad estudiado los valores oscilan entre 0,85 y 1,03 g/cm³. Estos mismos autores mencionan que valores no afectan el crecimiento del sistema radical de los cultivos, y más bien favorecen la utilización de maquinaria agrícola de poco peso para reducir la posibilidad de compactar los suelos y

erosionarlos. Para el caso de una profundidad de 0-20 cm, los valores promedios de densidad aparente fue de $0,87 \text{ g/cm}^3$.

En el caso del presente proyecto, las muestras se sacaron aproximadamente a 15 cm, teniendo resultados cercanos a $0,87 \text{ g/cm}^3$, muy similar al estudio mencionado en el párrafo anterior, por lo que los resultados son de mayor confianza. Utilizando el geoportal de suelos de Costa Rica, se conoce que el suelo del terreno analizado es de orden Andisoles (Figura 28).

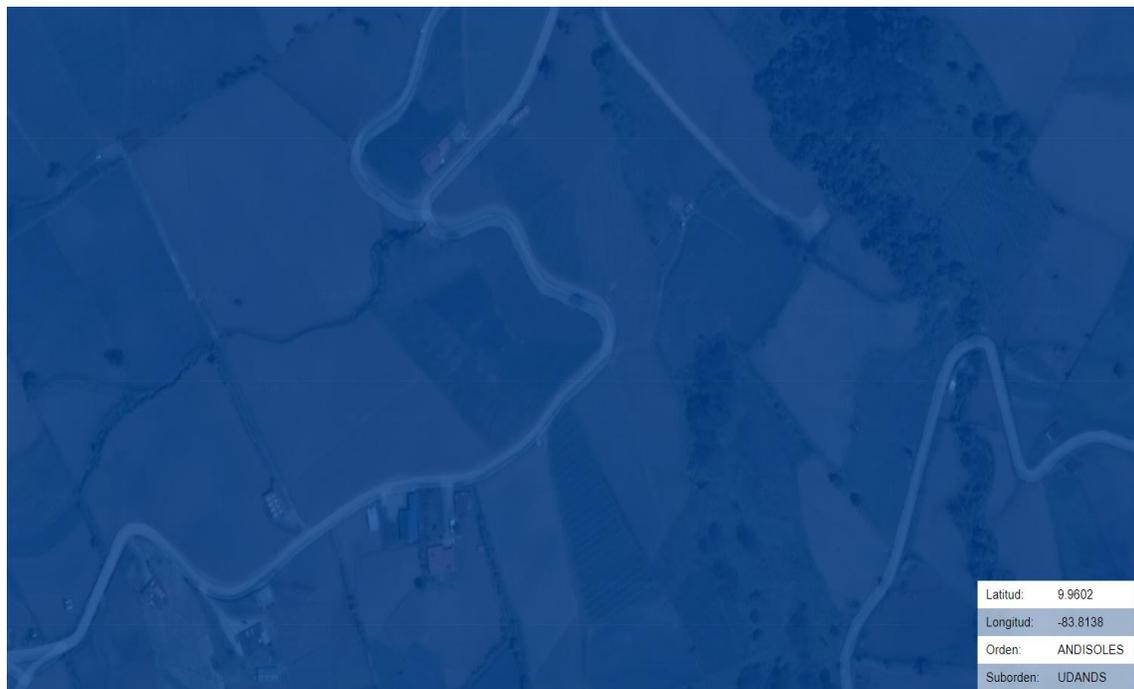


Figura 28. Vista sobre el área de estudio con capa de orden de suelos seleccionada. Fuente: www.suelos.cr.

Con respecto a el análisis de los Modelos de Elevación Digital construidos, se tiene el Cuadro 5 con especificaciones de los seis vuelos realizados para observar el movimiento del suelo por fotogrametría, donde se indica las imágenes alineadas para crear la nube de puntos dispersa, que posteriormente se tiene la nube de puntos densa con una cierta cantidad de puntos para luego obtener una malla y por último el DEM con su respectiva resolución por píxel.

La relación entre la cantidad de puntos en la nube dispersa y en la nube densa, condiciona la calidad del DEM en cuanto a su resolución espacial; por ejemplo, el vuelo del 28-2-2018 presenta la menor cantidad de puntos y además la menor resolución con $5,19 \text{ cm/píxel}$. Sin

embargo, la mejor resolución es del vuelo del día 2-2-2018, pero no es el que presenta la mayor cantidad de punto, aunque sí la mayor cantidad de imágenes alineadas.

Cuadro 5. Especificaciones de cada Modelo de Elevación Digital.

Fecha	Imágenes alineadas	Cantidad de puntos en nube dispersa	Cantidad de puntos en nube densa	Resolución de DEM/píxel (cm)
2-2-2018	244	176.365	18.966.818	3,97
15-2-2018	131	130.780	17.548.747	4,46
19-2-2018	125	134.890	28.406.942	4,13
28-2-2018	170	122.046	11.581.305	5,19
17-3-2018	195	179.004	25.612.626	4,13
31-3-2018	121	130.857	18.870.840	4,38

Los resultados de los Modelos de Elevación realizados se presentan en las Figuras 29, 30, 31, 32, 33, y 34. Todos los DEM fueron ajustados a los puntos de control colocados en campo, sin embargo, hay ligeras variaciones entre cada uno de ellos con relación a la altura del nivel del suelo, donde en algunas zonas es por varios centímetros la diferencia de altura; dentro de esta investigación está el comprobar qué tan acertada es esta tecnología para lograr medir milimétricas variaciones en el terreno.

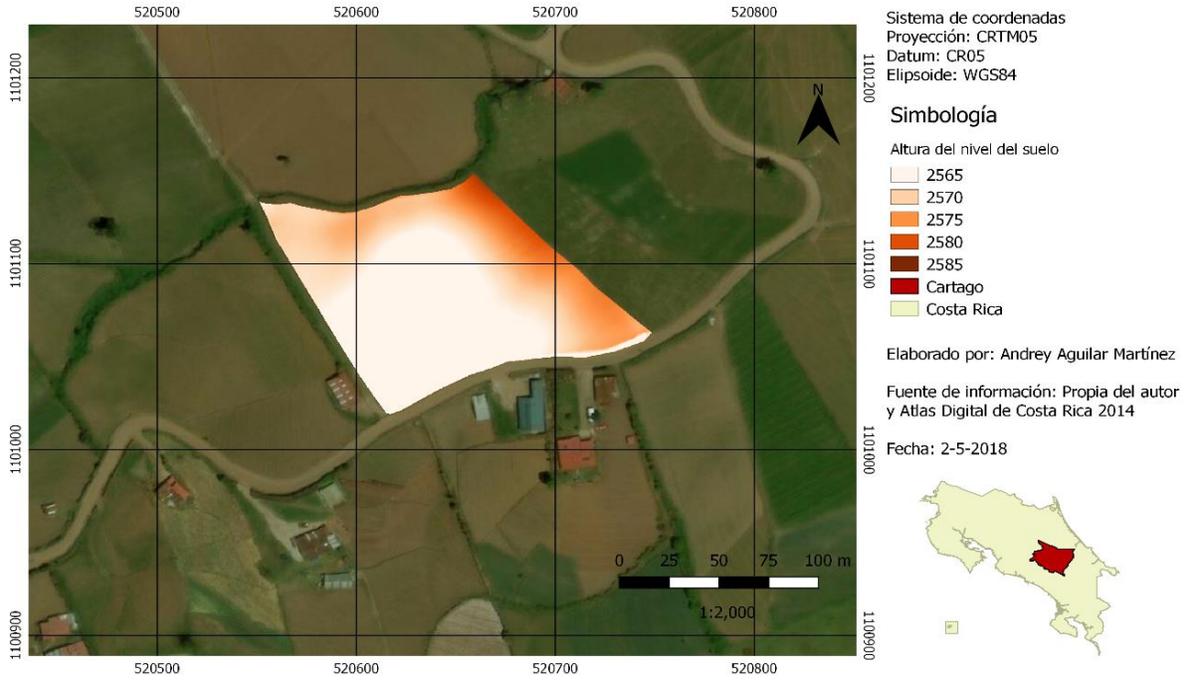


Figura 29. Modelo de Elevación Digital del 2-2-2018. Fuente: propia del autor.

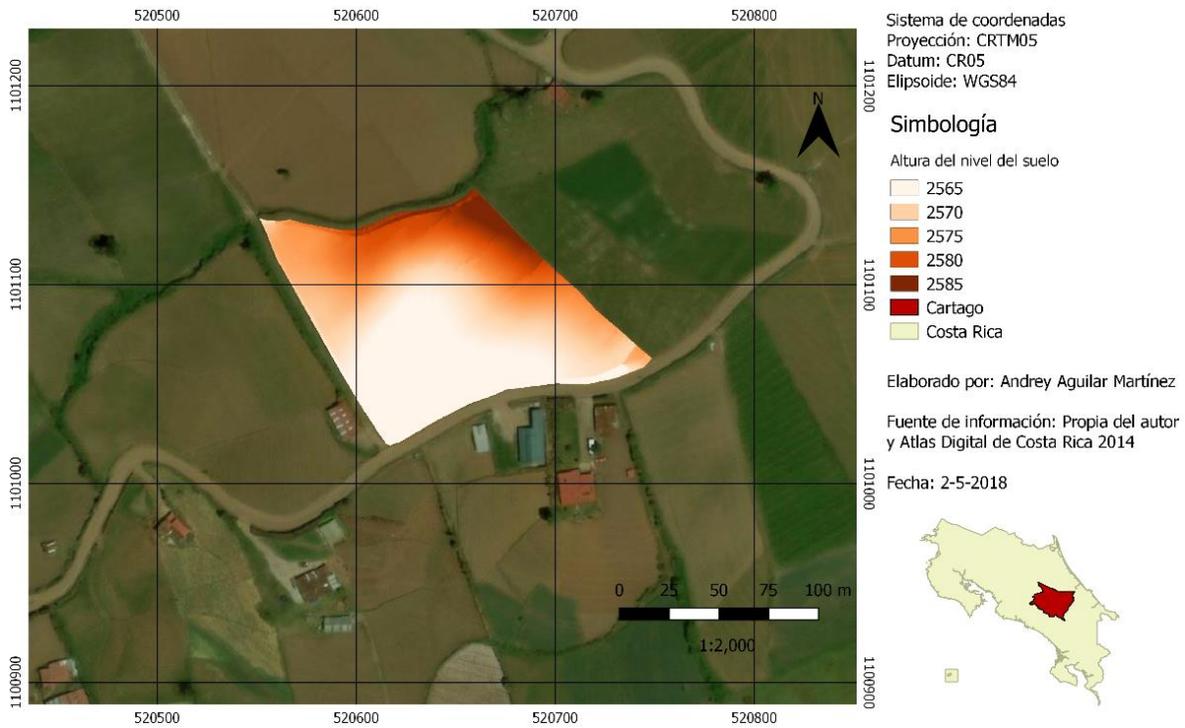


Figura 30. Modelo de Elevación Digital del 15-2-2018. Fuente: propia del autor.

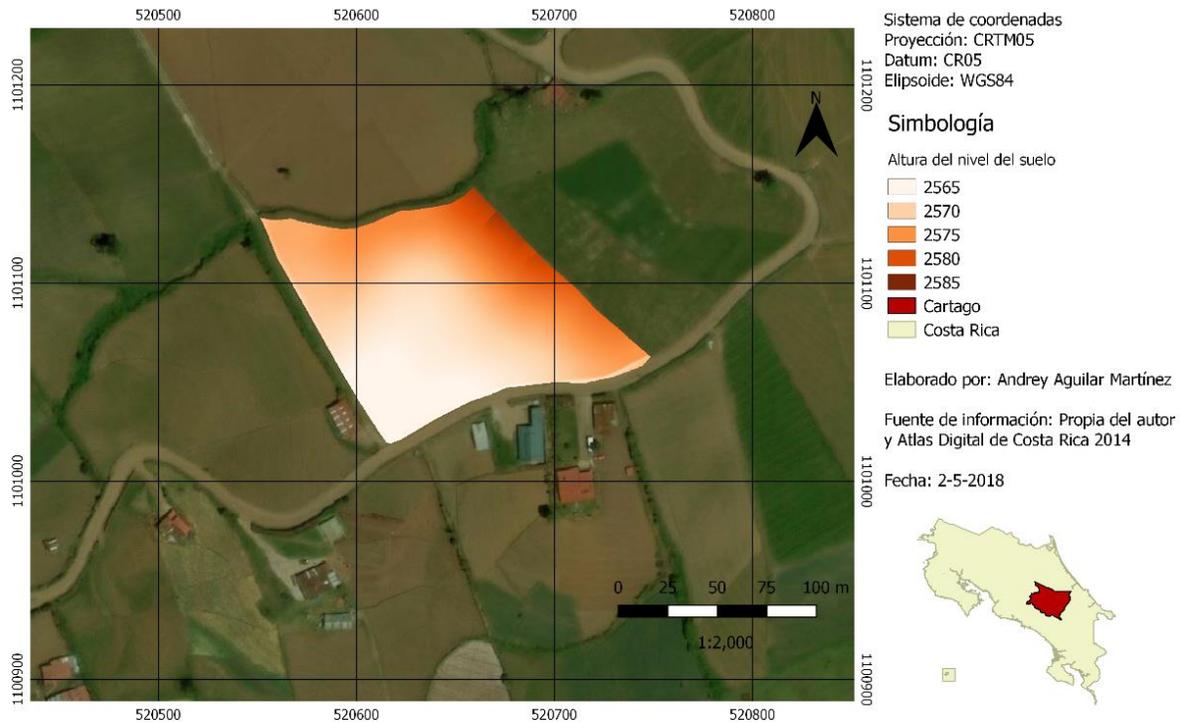


Figura 31. Modelo de Elevación Digital del 19-2-2018. Fuente: propia del autor.

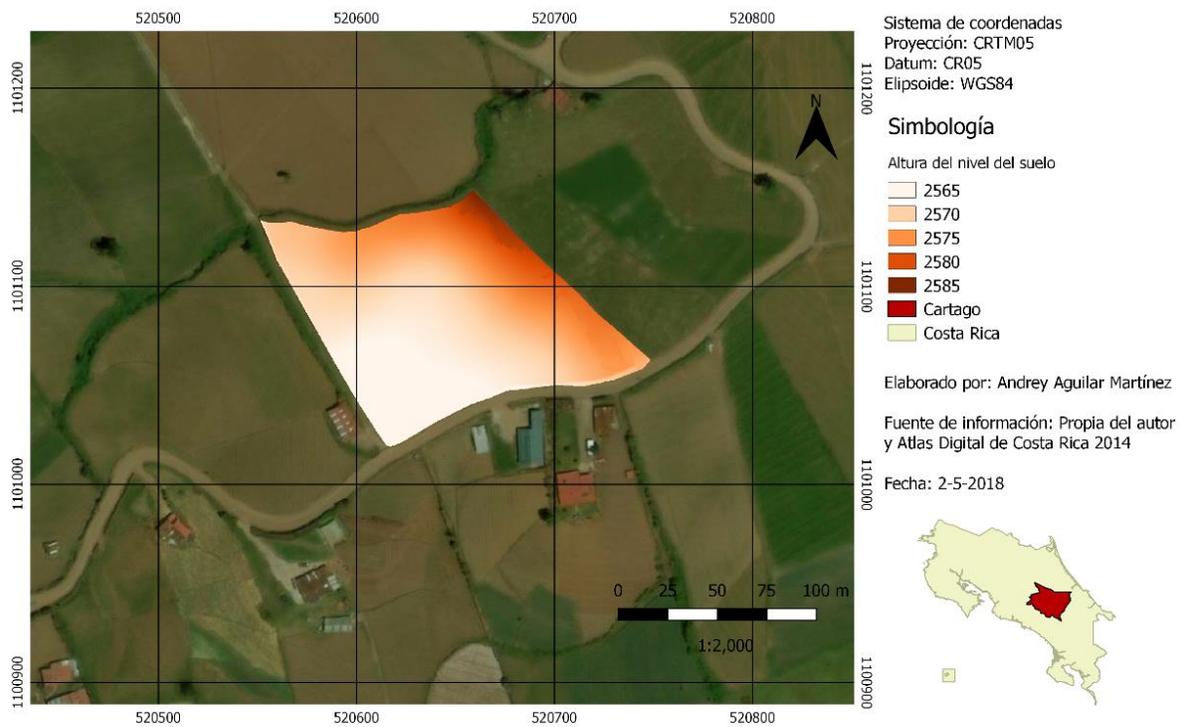


Figura 32. Modelo de Elevación Digital del 28-2-2018. Fuente: propia del autor.

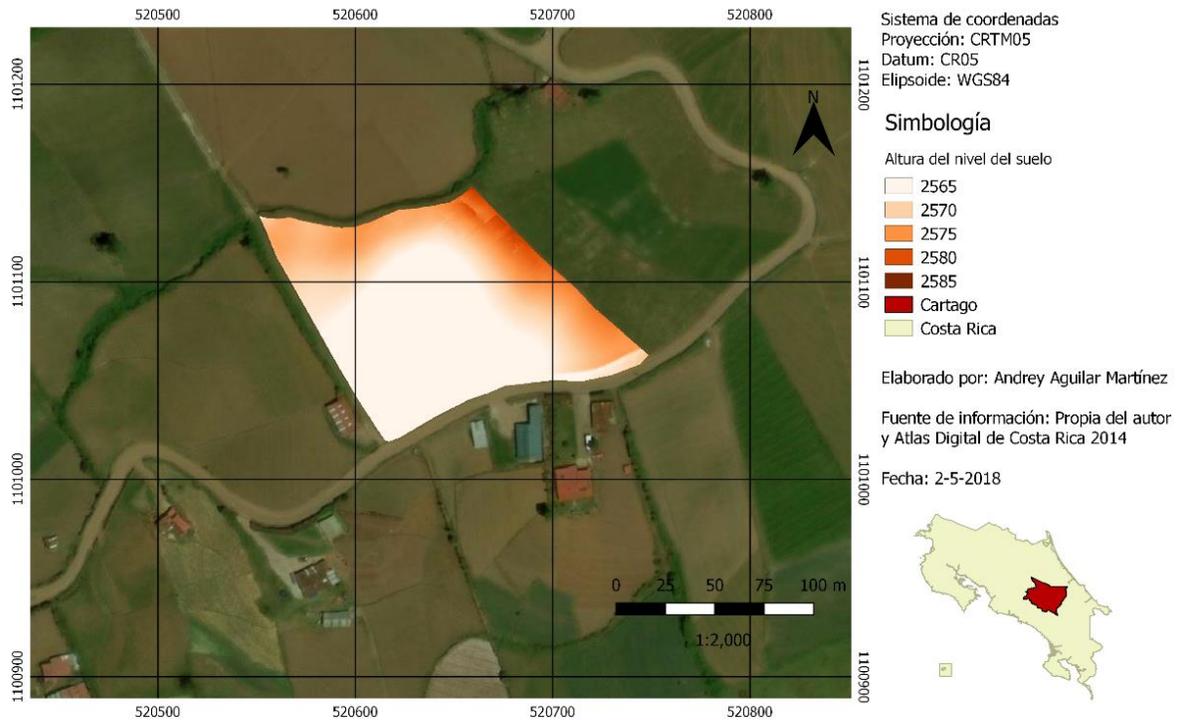


Figura 33. Modelo de Elevación Digital del 17-3-2018. Fuente: propia del autor.

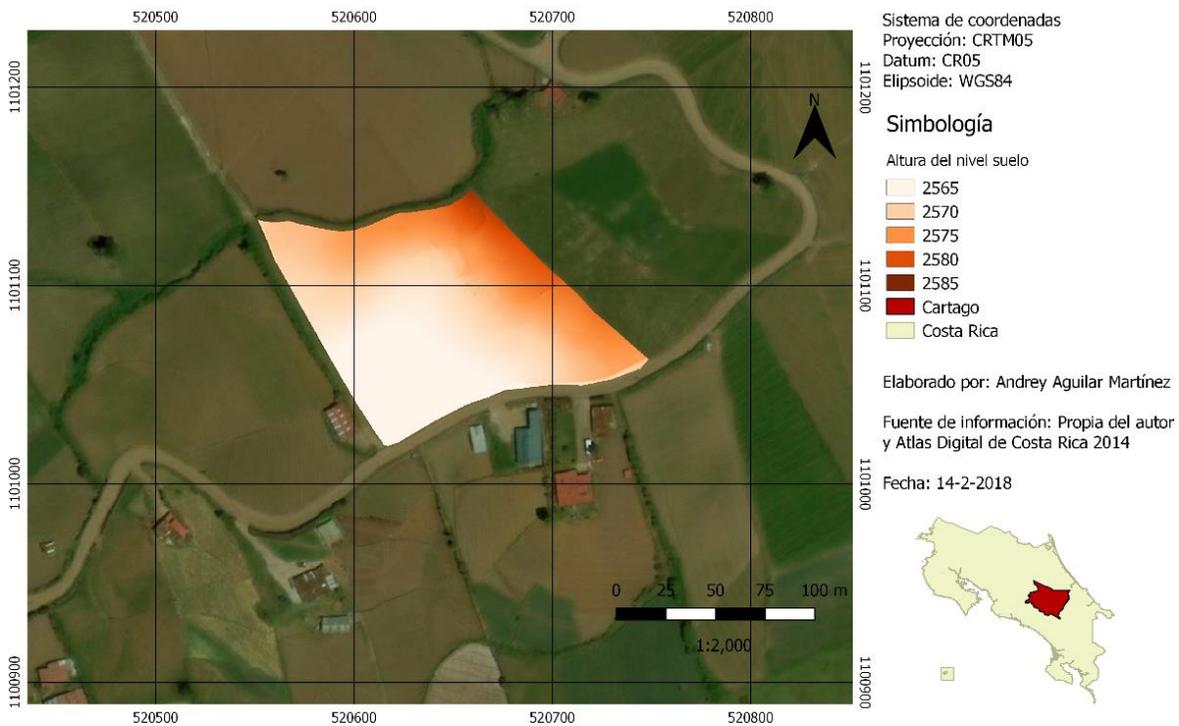


Figura 34. Modelo de Elevación Digital del 31-3-2018. Fuente: propia del autor.

La variación en el terreno a lo largo del tiempo por medio de fotogrametría se hizo comparando para un mismo punto la altura en los distintos DEM equivalentes a fechas distintas, donde se utilizó como referencia los puntos en los cuales se midió la resistencia a la penetración.

En el Cuadro 6 se muestran dichas alturas medidas en m.s.n.m de los diferentes Modelos de Elevación, se puede apreciar que, en el mayor porcentaje de los datos, la variación es por centímetros, esto nos indica que los cambios en el suelo medidos con dron son sumamente altos y esto generaría una erosión excesivamente alta, además, en algunos si se logra tener variaciones de milímetros, como en el caso del punto 6 donde la fecha del 28-2-2018 y el 31-3-2018 se da una variación del terreno de 6 milímetros. Los valores de las tres primeras mediciones tienen altas variaciones de centímetros, sin embargo, corresponden a las mediciones cuando el suelo estaba sin mecanizarse y luego posterior a la preparación del terreno, por lo que los implementos conforme iban avanzando levantaban el suelo una cierta cantidad de centímetros y que se puede apreciar en el campo de manera visual.

Del 19-2-2018 al 28-2-2018 es cuando se da la conformación de los surcos por medio de un arado colocado a un caballo, se produce un movimiento de suelo considerable, en algunas zonas queda más alto y en otras a menor altura con respecto al nivel en el que estaba el suelo, esto se puede apreciar en los puntos de referencia.

Cuadro 6. Elevaciones en m.s.n.m para cada punto de referencia en diferentes fechas.

Punto/Medición	02-Feb	15-Feb	19-Feb	28-Feb	17-Mar	31-Mar
1	2561,574	2561,995	2562,023	2561,991	2561,852	2561,818
2	2567,759	2566,078	2566,303	2566,446	2566,713	2566,663
3	2573,088	2573,573	2573,151	2573,343	2573,269	2573,155
4	2573,669	2574,608	2574,627	2574,712	2574,762	2574,853
5	2580,443	2580,998	2580,972	2581,332	2581,298	2581,282
6	2571,547	2571,588	2571,653	2571,558	2571,535	2571,552
7	2575,519	2575,494	2575,539	2575,887	2575,815	2575,772
8	2575,527	2575,765	2575,864	2576,027	2575,961	2575,926
9	2564,692	2564,644	2564,606	2564,822	2564,868	2564,874
10	2566,013	2565,096	2566,382	2566,251	2566,213	2566,192

Como comparación con los vuelos fotogramétricos están los puntos de medición en campo por medio de tubos con marcas de referencia (Figura 35), las variaciones en todos los puntos fueron de milímetros durante las tres mediciones que se hizo esta prueba, antes del 28-2-2018 no se recolectó información de campo debido a que no estaba colocados los surcos y había paso de personas, del caballo con su arado, esto iba a limitar una buena lectura del cambio en el nivel del suelo.



Figura 35. Marca de referencia en los tubos colocados en campo.

En el Cuadro 7 se presenta los cambios en el suelo para los puntos que se encontraron en el área donde únicamente se mecanizó con arado de cincele. En cada casilla se tiene la variación del suelo entre cada fecha de medición, en el caso del punto 2, entre el día 19-2-2018 y el día 28-2-2018 se aumentó en 2 mm con respecto a su marca de referencia, entre el 28-2-2018 y el 17-3-2018 aumentó 1 mm, por lo que se había acumulado para ese momento 3 mm, así respectivamente para cada medición.

Cuadro 7. Movimiento y pérdida de suelo en área con arado de cinceles.

Punto/ Medición	28-Feb (mm)	17-Mar (mm)	31-Mar (mm)
2	2	1	1
3	1	-3	0
4	2	3	-1
5	1	-2	-1
6	-2	-1	-2
10	-1	-1	-1
Altura (m)	0,0005	0,0005	0,00067
Densidad (ton/m ³)	0,864	0,865	0,885
Pérdida (ton/ha)	4,320	4,325	5,841

Posteriormente se obtiene el promedio de las variaciones totales en cada medición, se utiliza los resultados de la densidad aparente analizada anteriormente y con un promedio de las dos muestras de la zona de mecanización con arado de cinceles (Cuadro 8) se calcula la pérdida de suelo por medio de la ecuación 2 de la sección de Metodología.

Cuadro 8. Promedio de densidad aparente con arado de cinceles.

Densidad cinceles			
Fecha	Muestra 1 (ton/m ³)	Muestra 2 (ton/m ³)	Promedio (ton/m ³)
28-Feb	0,8374	0,8906	0,8640
17-Mar	0,8490	0,8805	0,8647
31-Mar	0,8917	0,8786	0,8851

Lo mismo se hizo para el área preparada con palín, donde se observa que las pérdidas de suelo con este tipo de implemento son menores (Cuadro 9), debido a que logra una menor compactación del suelo y por ende el agua tenga una mejor infiltración gracias a que existe mayor espacio poroso, esto se ve reflejado en que la densidad aparente en esta zona es menor (Cuadro 10).

Cuadro 9. Movimiento y pérdida de suelo en área con palín.

Punto/ Medición	28-Feb (mm)	17-Mar (mm)	31-Mar (mm)
1	0	1	3
7	1	2	-1
8	2	-1	1
9	-1	-1	-1
Altura (m)	0,0005	0,0005	0,00083
Densidad (ton/m ³)	0,85,9	0,835	0,837
Pérdida (ton/ha)	4,295	2,088	4,185

Cuadro 10. Promedio de densidad aparente con palín.

Densidad palín			
Fecha	Muestra 1 (ton/m ³)	Muestra 2 (ton/m ³)	Promedio (ton/m ³)
28-Feb	0,860	0,857	0,859
17-Mar	0,845	0,824	0,835
31-Mar	0,841	0,837	0,837

La precipitación en la zona de estudio es alta, esto es un factor que aumenta la erosión hídrica, además de las malas formas de mecanización que culturalmente se han hecho por años y que actualmente no se percibe un cambio que permita proteger el recurso más importante en la agricultura convencional como lo es el suelo.

El pluviómetro utilizado se encuentra frente al terreno de estudio (Figura 36), en el Cuadro 11 se presenta la precipitación con los datos del instrumento, se tiene registro desde una semana antes a realizar el primer vuelo, después se tienen los datos agrupados por fechas entre cada día de vuelo, con el fin de ver la variación de la precipitación a través de los días.

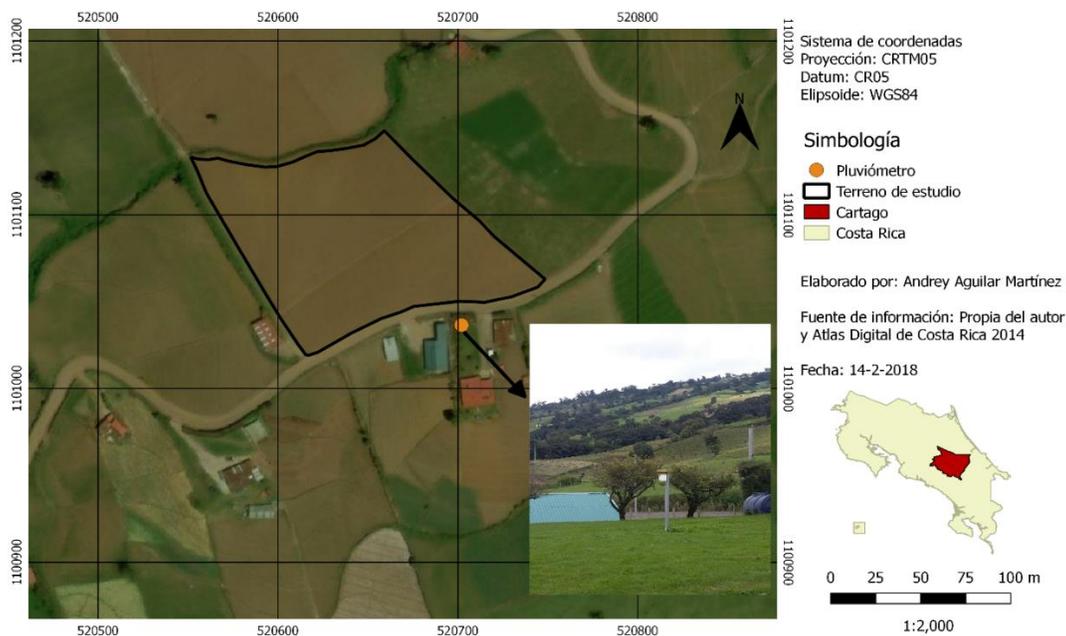


Figura 36. Pluviómetro instalado en San Rafael de Irazú, Pacayas, Cartago.

Se observa en el Cuadro 11 que los primeros días se tuvo altas precipitaciones, la constante entre el 26-1-2018 y el 2-2-2018 era la lluvia durante todo el día, lo que no permitía realizar ninguna actividad, esto afectó de gran manera en un atraso de aproximadamente 15 días en los planes del agricultor para realizar las labores de preparación del terreno hasta dejarlo completamente listo para la siembra.

Cuadro 11. Precipitación del lugar entre cada fecha de vuelo de dron.

Periodo (días)	Precipitación (mm)	Promedio diario (mm)
26-1-2018 / 1-2-2018	242,1	34,6
2-2-2018 / 14-2-2018	140,8	10,8
15-2-2018 / 18-2-2018	114,4	28,6
19-2-2018 / 27-2-2018	88,6	9,8
28-2-2018 / 16-3-2018	48,9	2,9
17-3-2018 / 31-3-2018	79,9	5,3

Con los demás resultados obtenidos en este proyecto, se observa que se presenta una relación entre la compactación del suelo y la precipitación, ya que conforme los días iban transcurriendo la resistencia a la penetración aumentaba, esto también debido al acomodo de las partículas del suelo a recuperar su estado natural, pero además se complementa con la cantidad de agua presente en el lugar.

En la Figura 37, se muestra de manera gráfica el comportamiento de la precipitación a lo largo de los días del proyecto, conforme pasaron los días hubo una disminución de la precipitación, solamente la segunda quincena de marzo aumentó en 30 mm cuestión de 14 días.

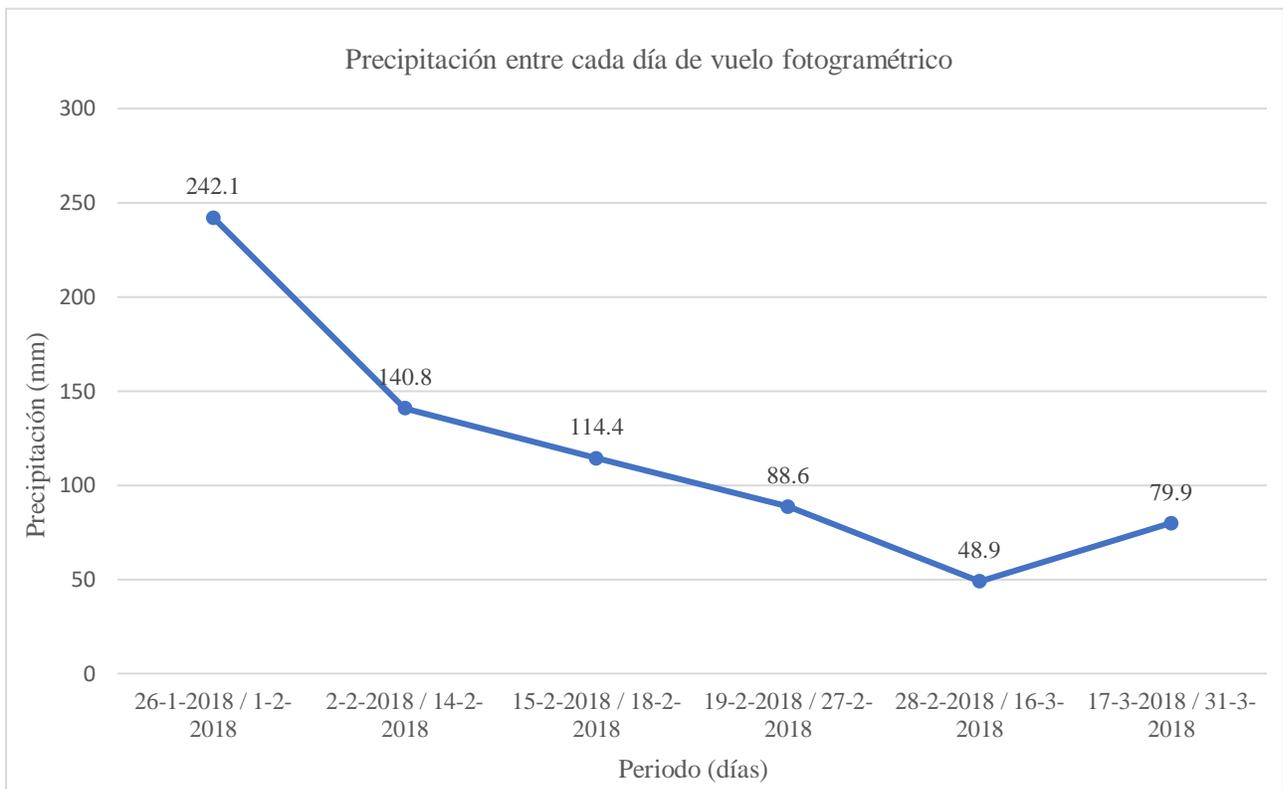


Figura 37. Comportamiento de la precipitación en el transcurso del tiempo durante el proyecto.

De igual forma, la pérdida de suelo también se ve afectada por la precipitación, como se ve en los resultados de las mediciones hechas en campo para medir la variación de suelo, la tasa de pérdida de suelo más baja se dio entre el 28-2-2018 y el 17-3-2018, y en estos mismos días fue cuando se presentó la precipitación más baja entre fechas de vuelo.

5. ANÁLISIS SOCIAL, AMBIENTAL Y ECONÓMICO

Para el presente proyecto se realizó un análisis de proyección de los posibles impactos sociales, ambientales y económicos que se generarían en el momento en que se desarrolle este tipo de metodología para el análisis del recurso suelo a través de tecnología. A continuación, se mencionan los impactos esperados en proyectos que se lleven a cabo mediante fotogrametría.

5.1. Análisis social

- La implementación de esta tecnología en la agricultura convencional permitirá demostrar a productores y productoras sobre mejores labores y técnicas de trabajo, con el fin de desarrollar una conciencia de conservación del recurso suelo.
- El sector agrícola y la población se verán beneficiados debido a que se incrementarán las producciones, esto permitirá tener abastecimiento de productos durante todo el año, además se podrá reducir las importaciones y se le dará un valor de más aprecio a los productos agrícolas de Costa Rica.
- En la población se tendrá beneficios en reducción de erosión que provocan principalmente problemas como: desborde de alcantarillas, inundaciones de casas, bloqueos de calles y carreteras; por lo cual las personas pueden vivir de forma más segura.
- A nivel país se puede reducir los gastos realizados por Instituciones del Estado, por lo que esos montos se pueden utilizar en otras necesidades del país.

5.2. Análisis ambiental

- Decrecer índices de pérdida de suelo gracias a las mejoras en los procesos de preparación de suelos, a partir de seleccionar los implementos adecuados dependiendo de las condiciones del lugar como topografía, textura de suelo, cultivo y precipitación.
- Disminuir la compactación de suelo mediante la selección y uso de aperos correctos para las condiciones presenten en cada zona, además los productores tendrán previo

conocimiento de cuáles equipos le permiten tener mejores condiciones en las plantas que se pueden ver reflejadas en mayor y mejor cosecha.

- Reducir escorrentía superficial, debido a que logrando una mejor mecanización del suelo se tiene una mayor infiltración del agua, por lo tanto, en un evento de precipitación la cantidad de agua que fluya superficialmente será menor y esto genera disminución en el movimiento de suelo a causa de erosión, lo que es un beneficio tanto para nivel de finca como en la localidad.
- Aumentar la fertilidad del suelo reduciendo la pérdida de elementos presentes y que son arrastrados por el agua y el suelo cuando hay casos de erosión hídrica. Esto permite que la reposición de minerales al suelo sea menor, por lo que el impacto ambiental en el suelo es menor.

5.3. Análisis económico

El análisis económico de este proyecto se basa en el costo de la preparación del terreno con los distintos implementos utilizados, el costo del procesamiento de los vuelos realizados más ciertos materiales adicionales.

En el Cuadro 12 se muestra que fueron 20 horas las necesarias para realizar la preparación del terreno, esto tanto para el señor Milton Aguilar quien se dedica a mecanizar por contrato, como para el señor José Rafael Aguilar, dueño de la finca.

Cuadro 12. Costo de preparación del terreno.

Mecanización	
Horas mecanizadas (h)	20
Costo/hora (₡/h)	15000
Total (₡)	300000

El costo económico del procesamiento fotogramétrico se presenta en el Cuadro 13, en el cual se desglosa como se calculó el costo total del procesamiento, además de que existe un costo

aproximado en el mercado con el cual las empresas dedicadas a servicios de vuelo de dron para procesado de datos y entrega de resultados, donde se puede obtener el costo por hectárea de terreno analizada. En este caso se realizó la consulta al Ingeniero Topógrafo, Jonathan Segura, él cuenta con experiencia desarrollando proyectos de vuelo y procesamiento de imágenes para fines como la agricultura, ganadería, forestería, entre otros.

Cuadro 13. Costo de método fotogramétrico.

Procesamiento fotogramétrico	
Costo de procesamiento/ha (₡)	45000
Área (ha)	1,35
Costo de procesamiento (₡)	74250
Número de vuelos	6
Materiales adicionales (₡)	10000
Total (₡)	445500

Una vez calculados los costos de preparación del terreno y los del procesamiento fotogramétrico, solo se sumó ambos datos para tener el costo total del proyecto realizándose de esta manera, con el fin de obtener un estudio para determinar si realizar estudios de suelo por medio de fotogrametría es económicamente viable para lograr aumentar rendimientos de producción y disminuir pérdidas económicas y del recurso suelo. Al final el costo total del proyecto mediante fotogrametría es de ₡445500.

Para demostrar si existe una diferencia en la producción de acuerdo con la mecanización realizada, se hizo un conteo de papas en un área de 5 m² (Figura 38), se sabe que el área de estudio es de 1,35 ha, por lo que se hizo la regla de 3 para obtener aproximadamente la producción total que se tendrá, esto debido a que la fecha en la que se realizó este procedimiento el cultivo de papa todavía no estaba listo para cosecharse. En el Cuadro 14 se muestran los resultados finales del conteo, se realizó 2 muestreos en cada área de interés de los implementos utilizados, donde se hizo el conteo para 9 plantas por muestreo como se muestra en los Cuadros 15 y 16; se hizo una suma de papas por zona de muestreo y un promedio para los dos sitios en cada área de mecanización.



Figura 38. Conteo de papas en un área de 5 m².

Cuadro 14. Conteo final de papas por muestreo de zona.

Muestra	Cinceles		Palín	
	1	2	1	2
Suma	136	144	143	147
Promedio	140		145	

Según consultas realizadas a comerciantes de este cultivo, mencionan que 10 papas es equivalente a 1 kg aproximadamente, por lo que para arado de cinceles se obtuvo un total de 14 kg y para palín 14,5 kg. Los resultados esperados en la cosecha futura se muestran en el Cuadro 15, donde son los calculados de acuerdo con la proyección con el área del terreno.

Cuadro 15. Cosecha esperada según proyección.

En 5 m²	14.5 kg	14 kg
En 1.35 ha	39150 kg	37800 kg

Comúnmente la unidad más utilizada para venta es el quintal, este equivale a 45,3 kg, y aproximadamente 21 quintales es una tonelada; por lo que, con los resultados anteriores, con cinceles se tendrá 794 quintales y con palín 822 quintales, para una diferencia de 26 quintales más con el uso de palín. El día en el que se hizo el presente análisis económico, el costo de un quintal era de ₡25000. En el Cuadro 16 se puede observar los ingresos esperados si se mecanizara solo con arado de cinceles o si por el contrario se realiza con palín.

Cuadro 16. Ingresos esperados según tipo de mecanización.

Cinceles	₡19.845.000
Palín	₡20.553.750
Diferencia	₡708.750

Como se aprecia en el cuadro anterior, existe una diferencia notable entre los rendimientos que puede esperar un productor con el hecho de mecanizar con palín, para un suelo de textura Franco Arenosa. Dicho de otra forma, el agricultor puede estar dejando de percibir ₡708.750 aproximadamente en 1,35 ha por estar mecanizando con otros implementos que no son los que logran mejorar las condiciones de las plantas dentro del suelo.

Otro factor económico involucrado es la pérdida de suelo, que es un recurso que constantemente se está perdiendo, especialmente en zonas con altas pendientes y donde las labores de preparación del suelo no son las correctas, ya que principalmente utilizan implementos que dejan expuesto al suelo a la erosión. En la mayoría de los casos los agricultores están enterados de la alta erosión que sucede en la zona norte de Cartago, pero no tienen datos de cuánto les representa económicamente esta pérdida, ya que los terrenos son un bien y que poco a poco se degrada y esto genera menor volumen de suelo.

Con base en lo anterior, se presenta en el Cuadro 17 el costo económico del suelo que se perdió en este proyecto; para ello, se tomó como pérdida de suelo la mayor diferencia de erosión en las mediciones realizadas, que fue en la fecha del 17-3-2018, en la cual entre el uso de cinceles y palín se tiene una diferencia de 2,2675 ton/ha, de acuerdo con los resultados presentados

anteriormente que se obtuvieron gracias a la medición en campo con los tubos colocados y calculada la erosión estimada con la ecuación de pérdida de suelo de la sección de Procedimiento.

Cuadro 17. Costo económico de suelo perdido.

Pérdida de suelo	2,2675 ton/ha
En 1 año	13,605 ton/ha/año
Densidad de suelo	0,835 ton/m ³
Precio m3	¢10000/m ³
Pérdida/ha	16,3 m ³ /ha/año
Costo total/ha	¢162934

Como se muestra en el cuadro anterior, se tiene una densidad de suelo de 0,835 ton/m³. Por experiencia del Ing. Adrián Chavarría Vidal, profesor de la Escuela de Ingeniería Agrícola y con más de 15 años de experiencia en la empresa Palma Tica en el área de drenaje, brinda el dato del valor de precio de ¢10000 por cada metro cúbico de suelo. Se tiene una pérdida por hectárea de 16,3 m³/ha/año, por lo que usando arado de cinceles se tiene una pérdida económica de suelo mayor de ¢162.934 por hectárea por año, en 1,35 ha sería de ¢219.961, en comparación si se mecanizara por completo con palín.

Por otra parte, existe poca investigación en el país sobre este tipo de estudios utilizando equipos tecnológicos que están cada vez más de moda, especialmente en zonas dedicadas a la agricultura de verduras y hortalizas como lo es la zona norte de la provincia de Cartago, ya que esta tecnología se ha aplicado en su mayoría en cultivos de grandes extensiones como caña de azúcar, palma africana y banano.

La manera de comprobar si económicamente la inversión que realiza un agricultor contratando los servicios para realizar los cálculos de aumento de rendimiento y disminución de pérdida de suelo, es mediante el Valor Actual Neto (VAN) y la Tasa Interna de Retorno (TIR).

En el Cuadro 18 se observa el comportamiento de flujo de efectivo desde el año cero hasta una proyección a cinco años futuro, tomando en cuenta el costo inicial, los costos fijos de la mecanización en todos los años, y como valores de ingreso se tiene el dinero que el agricultor está dejando de perder gracias a mecanizar con un determinado implemento, en este caso el Palín; además, se vio que con este apero hay un leve aumento en la producción, por lo que esto se convierte en otro ingreso que el productor estaba dejando de percibir.

Cuadro 18. Comportamiento de flujo de efectivo durante los próximos cinco años.

	Año 0	Año 1	Año 2	Año 3	Año 4	Año 5
Costo inicial	-745500					
Gastos fijos		-300000	-300000	-300000	-300000	-300000
Prevención de erosión	-	219961	219961	219961	219961	219961
Aumento en producción	-	708750	708750	708750	708750	708750
Flujo de efectivo	-745500	628711	628711	628711	628711	628711

En el Cuadro 19, se encuentran los resultados del VAN y el TIR, a partir de los valores del flujo de efectivo realizado anteriormente. Estos resultados nos dan un panorama favorable, ya que se recomienda que el VAN sea positivo para llevar a cabo un proyecto, y el TIR debe de ser mayor al costo de los recursos al que se fijó, en este caso en 10%, al ser así el proyecto es económicamente factible.

Cuadro 19. Criterios de evaluación de proyectos.

VAN	₡1.962.495
TIR	80%

6. CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES

6.1. CONCLUSIONES

Según las observaciones del estudio, conforme transcurre el tiempo el suelo tiende a compactarse debido al acomodo de sus partículas, paso de personas. A mayor profundidad mayor es la resistencia a la penetración en las condiciones de suelo franco arenoso de orden Andisoles.

La mecanización con palín reduce la resistencia a la penetración, hasta por lo menos 40 cm, esto debido a que sus paletas logran suavizar más uniformemente el suelo, el arado de cinceles deja entre sus picos zonas donde no se logra aflojar el suelo y por ende la resistencia a la penetración se mantiene alta.

La observación del comportamiento del suelo por medio de fotogrametría es posible, sin embargo, los resultados obtenidos no son precisos en comparación a la medición de variación en la superficie con varillas indicadoras de tasa de erosión, ya que los cambios detectados son sumamente altos cuando se refiere a movimientos debido a erosión hídrica o compactación del suelo.

A pesar de que las diferencias entre cada vuelo son altas para referirse a movimiento de suelo en un corto periodo, se pueden detectar variaciones, por lo que se debe realizar más investigación para lograr mayor precisión en la información, esto con el fin de que esta técnica sea cada vez más utilizada en la agricultura para poder predecir y detectar posibles problemas en pérdidas de suelo.

El uso de la tecnología de fotogrametría está en un crecimiento acelerado, y se debe seguir investigando acerca de las ventajas y limitaciones que presenta, además, poder demostrar que la agricultura puede ligarse a los nuevos desarrollos de grandes compañías de electrónica y computación.

La tasa de erosión es mayor en terrenos mecanizados con arado de cinceles, llegando en este proyecto a un valor de 5,841 ton/ha.

A medida que la precipitación aumenta, a su vez se incrementa la tasa de pérdida de suelo, por lo que la precipitación es un factor que debe tomarse en cuenta a la hora de seleccionar un implemento agrícola para mecanizar.

Existe un beneficio social y ambiental relacionado a generar información mediante la fotogrametría, ya que se pueden detectar problemas existentes en una finca que afectan a un productor o un pueblo y que se pueden corregir, entre ellos la disminución de la erosión que provoca problemas como desborde de alcantarillas, inundaciones, derrumbes, entre otros.

Los rendimientos de cosecha son más altos en terrenos donde se mecaniza con arado excavador, ya que las raíces logran desarrollarse de mejor manera, esto representa mayores ganancias económicas para los agricultores, en este proyecto se puede.

Los rendimientos de cosecha son menores si se mecaniza con arado de cinceles, en este estudio el agricultor puede estar dejando de percibir ₡708.750 en producción, y pierde de suelo aproximadamente ₡220.000 en 1,35 ha.

6.2. RECOMENDACIONES

Para ensayos de validación:

- a) Se recomienda tener un penetrómetro con menor incertidumbre para lograr datos más exactos, ya que con el utilizado se debía anotar mediciones con valores muy inciertos.
- b) Para realizar Modelos de Elevación Digital, se recomienda colocar puntos de control dentro del terreno, ya que algunos valores erróneos son en zonas donde no se encontraba un punto de control cercano.

Aplicación de tecnología en la agricultura:

- a) Se recomienda realizar mayor investigación en el área de fotogrametría con énfasis en la agricultura, ya que es un campo con excelentes oportunidades de trabajo y negocio, y mayor conocimiento para los agricultores.
- b) Esta investigación queda abierta con fines de mejoramiento para que en algún otro estudio se pueda analizar comportamientos del suelo con resultados de mayor precisión.
- c) Las universidades deben seguir transmitiendo los conocimientos a los agricultores, especialmente los pequeños productores, los cuales no siempre cuentan con los recursos económicos para analizar el estado de sus cultivos y en qué áreas pueden mejorar.

7. REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- Aerosar. (s.f.). ¿En qué consiste la fotogrametría y teledetección? Recuperado el 14 de febrero de 2018, de http://aerosar.es/modelos_digitales/
- Agisoft. (2014). Agisoft PhotoScan. Recuperado el 15 de febrero de 2018, de <https://www.agisoft.es/products/agisoft-photoscan/>
- Alvarado, A. (2004). *Maquinaria y Mecanización Agrícola*. San José: EUNED.
- Alvarado, A., & Forsythe, W. (2005). VARIACIÓN DE LA DENSIDAD APARENTE EN ÓRDENES DE SUELOS DE COSTA RICA. *Agronomía Costarricense*, 29(1), 85–94.
- Cortés, A., Camacho, J., & Leiva, F. (2013). Análisis multivariado del comportamiento espacial y temporal de la resistencia del suelo a la penetración. *Acta Agronómica*, 62(3), 268–278. Recuperado de https://revistas.unal.edu.co/index.php/acta_agronomica/article/view/35766/44234
- Cubero, D. (1994). *Manual de manejo y conservación de suelos y aguas*. San José: EUNED.
- Ellies, A., MacDonald, R., & Ramírez, C. (1991). Efecto de las Propiedades Mecánicas sobre Suelos Rojo-Arcillosos del Centro-Sur de Chile. *Turrialba*, 41(4), 493–499. Recuperado de <https://books.google.co.cr/books>
- FAO. (s.f.). Soluciones para la compactación del suelo. Recuperado el 14 de febrero de 2018, de http://www.fao.org/ag/ca/training_materials/cd27-spanish/sc/soil_compaction.pdf
- FAO. (1997). Métodos de reconocimiento. *Medición sobre el Terreno de la Erosión del Suelo y de la Escorrentía*. Roma. Recuperado de <http://www.fao.org/docrep/>
- FAO. (2015). Los suelos sanos son la base para la producción de alimentos saludables. Recuperado el 15 de febrero de 2018, de <http://www.fao.org/soils-2015/news/news-detail/es/c/277721/>
- Flores, J. (2016). La tecnología y utilización emergente de drones en la agricultura. Recuperado el 13 de febrero de 2018, de <http://www.hortalizas.com/proteccion-de-cultivos/la-tecnologia-y-utilizacion-emergente-de-drones-en-la-agricultura/>
- Gómez, N., Villagra, K., & Solórzano, M. (2018). La labranza mecanizada y su impacto en la conservación del suelo (revisión literaria). *Revista Tecnología En Marcha*, 31(1), 170. <https://doi.org/10.18845/tm.v31i1.3506>

- Inostroza, J. (2009). *Manual de Papa para la Araucanía: Manejo y Plantación* (No. 193). Temuco, Chile. Recuperado de <http://www2.inia.cl/medios/biblioteca/boletines/NR36470.pdf>
- INTAGRI. (2017). Propiedades Físicas del Suelo y el Crecimiento de las Plantas. Recuperado el 15 de febrero de 2018, de <https://www.intagri.com/articulos/suelos/>
- López, S., Montero, M., & Hernández, J. (2010). *Modelos Digitales del Terreno: herramientas para la planificación agrícola*. Recuperado de <http://www.mapama.gob.es/ministerio/pags/biblioteca/revistas/>
- Medina, G., Grageda, J., Ruiz, J., & Báez, A. (2008). *Uso de Estaciones Meteorológicas en la Agricultura*. Zacatecas. Recuperado de <http://www.zacatecas.inifap.gob.mx/publicaciones/>
- Meliá, J. (1991). *La teledetección en el seguimiento de los fenómenos naturales. Recursos renovables: agricultura*. Valencia: Universitat de València. Recuperado de <https://books.google.co.cr/books>
- Núñez, J. (2006). *Manual de Laboratorio de Edafología*. San José.
- Reynolds, A. (2017). Why is a Rian Gauge important? Recuperado el 15 de febrero de 2018, de <https://sciencing.com/rain-gauge-important-6611576.html>
- Rubio, A. (2010). *La densidad aparente en suelos forestales del parque natural Los Alcornocales*. Universidad de Sevilla. Recuperado de <http://digital.csic.es/bitstream/10261/57951/1/>
- Thompson, L., & Troeh, F. (1988). *Los suelos y su fertilidad* (Cuarta). Barcelona: Reverté S.A. Recuperado de <https://books.google.co.cr/books>
- Villalobos, M., Guzmán, I., & Zúñiga, C. (2009). Evaluación de tres tipos de labranza en el cultivo de la papa (*Solannum tuberosum*). *Ecnología En Marcha*, 22(2), 40–50.
- Villón, M. (2004). *Hidrología*. Cartago, Costa Rica: Editorial Tecnológica de Costa Rica.
- Zinck, A. (2005). Suelos, información y sociedad. *Gaceta Ecológica*, 76, 7–22.

8. ANEXOS

Anexo 1: Procedimiento del método de Bouyoucos

El procedimiento comienza secando la muestra de suelo en estufa a 105 °C durante 12- 24 horas, se pesa 40 g de suelo seco y en un tamíz ASTM número 10 de 2 mm de abertura se tamiza. Se coloca el suelo en la copa dispersadora, se agrega 15 ml de hexametafosfato de sodio de 10 % m / v y 400 ml de agua, se coloca la copa en el dispersador eléctrico y se agita en velocidad lenta a 2400 rpm, durante cinco minutos.

Se transfiere a un cilindro de Bouyoucos el contenido total de sedimentos de la copa dispersadora, luego se llena el cilindro hasta la marca inferior, de 1000 ml, se coloca el hidrómetro dentro y se comprueba que indica la marca de 1130 ml. Posteriormente se saca el hidrómetro para agitar la suspensión vigorosamente, y luego se coloca en la mesa de trabajo. A partir de ese momento se toma el tiempo y se realiza la primera lectura del hidrómetro a los 40 segundos e inmediatamente después la temperatura.

Dos horas después se realiza la segunda medición del hidrómetro y de la temperatura. Se debe realizar correcciones por temperatura, es decir, por cada grado encima de 19,4 °C se suma 0,3 a la lectura del hidrómetro (40 s y 2 h), caso contrario si está por debajo de 19,4 °C, se resta 0,3 a las lecturas del hidrómetro. Una vez hechas las correcciones se calcula el porcentaje de partículas, por medio de las ecuaciones 3, 4 y 5.

$$\% \text{ Arena total} = 100 - \left(\frac{\text{Lectura corregida a los 40" * 100}}{\text{Masa de suelo seco (g)}} \right) \quad (3)$$

$$\% \text{ Arcilla total} = \left(\frac{\text{Lectura corregida a las 2 horas * 100}}{\text{Masa de suelo seco (g)}} \right) \quad (4)$$

$$\% \text{ Limo} = 100 - (\% \text{ Arena} + \% \text{ Arcilla}) \quad (5)$$

Por último, se utiliza el triángulo de texturas de la FAO (Figura 39), el cual tiene escalas de 0 a 100 en sus tres vértices, separados 10 unidades, se parte del valor del porcentaje de arena, arcilla y limo, se traza una línea hacia el centro del triángulo, donde se intercepten las tres líneas indica el nombre textural de la muestra.

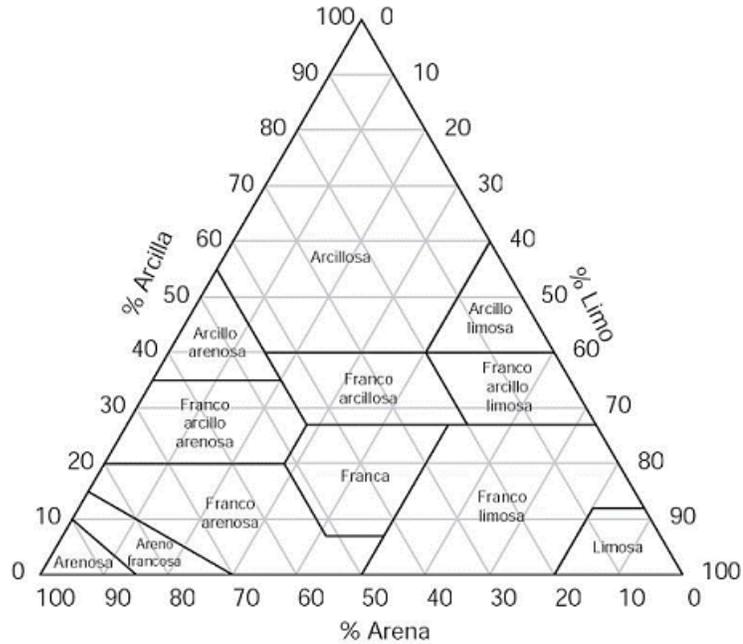


Figura 39: Triángulo de texturas. Fuente: www.agromatica.es

Anexo 2: Prueba de Bouyoucos realizada en el laboratorio.

Cuadro 20. Resultados de la prueba Bouyoucos.

Muestra	Medición	Hidrómetro		Temperatura		Corrección hidrómetro	
		40 s	2 h	40 s	2 h	40 s	2 h
1	1.1	19	5	21	22	0.48	0.75
	1.2	19.5	5	21	22	0.48	0.75
2	2.1	19	4	21.5	22	0.63	0.75
	2.2	19	4	20.5	21.5	0.48	0.63

Anexo 3: Prueba en campo para determinar proyección de cosecha esperada.

Cuadro 21. Cantidad de papas en zona de mecanización con arado de cinceles.

# de planta/Muestreo	1	2
1	12	14
2	14	19
3	13	17
4	16	17
5	15	14
6	16	18
7	15	14
8	17	16
9	17	15

Cuadro 22. Cantidad de papas en zona de mecanización con arado excavador.

# de planta/Muestreo	1	2
1	17	17
2	16	15
3	17	19
4	19	17
5	16	18
6	13	15
7	16	14
8	14	15
9	15	17

