

INSTITUTO TECNOLÓGICO DE COSTA RICA

VICERRECTORÍA DE DOCENCIA

ESCUELA DE INGENIERÍA AGRÍCOLA



Informe de Trabajo Final de Graduación

IMPLEMENTACIÓN DE UN SISTEMA DE MONITOREO PARA PASTOREO DE
PRECISIÓN MEDIANTE EL ANÁLISIS DE SUELO Y GESTIÓN A TRAVÉS DE
INFORMACIÓN DE SENSORES REMOTOS PARA LA MEJORA EN LA CALIDAD Y
OPTIMIZACIÓN EN LA PRODUCCIÓN DE FORRAJES EN FINCA LA GRANJA
UBICADA EN PACAYAS DE ALVARADO, CARTAGO.

LUIS ALFREDO SERRANO MONTENEGRO

CARTAGO, MAYO 2023

IMPLEMENTACIÓN DE UN SISTEMA DE MONITOREO PARA PASTOREO DE
PRECISIÓN MEDIANTE EL ANÁLISIS DE SUELO Y GESTIÓN A TRAVÉS DE
INFORMACIÓN DE SENSORES REMOTOS PARA LA MEJORA EN LA CALIDAD Y
OPTIMIZACIÓN EN LA PRODUCCIÓN DE FORRAJES EN FINCA LA GRANJA
UBICADA EN PACAYAS DE ALVARADO, CARTAGO.

LUIS ALFREDO SERRANO MONTENEGRO

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

Kerin Romero Calvo

Asesor

Isabel Guzmán Arias

Director Escuela
Ingeniería Agrícola

INSTITUTO TECNOLÓGICO DE COSTA RICA

CARTAGO, COSTA RICA

2023



Esta obra está bajo una [Licencia Creative Commons Atribución-NoComercial-CompartirIgual
4.0 Internacional](https://creativecommons.org/licenses/by-nc-sa/4.0/).

CONSTANCIA DE DEFENSA PÚBLICA DE TRABAJO DE GRADUACIÓN

A las 9 horas del día 03 del mes de Mayo del año 2023 el estudiante:
Luis Alfredo Serrano Montenegro

presenta y defiende su trabajo de graduación titulado:

IMPLEMENTACIÓN DE UN SISTEMA DE MONITOREO PARA PASTOREO DE
PRECISIÓN MEDIANTE EL ANÁLISIS DE SUELO Y GESTIÓN A TRAVÉS DE
INFORMACIÓN DE SENSORES REMOTOS PARA LA MEJORA EN LA
CALIDAD Y OPTIMIZACIÓN EN LA PRODUCCIÓN DE FORRAJES EN FINCA
LA GRANJA UBICADA EN PACAYAS DE ALVARADO, CARTAGO.

ante el Tribunal de Evaluación compuesto por los siguientes miembros:

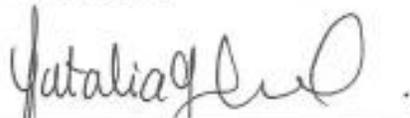
Presidente (a): Dra. Natalia Gómez Calderón

Lector (a): Ing. Valeria Serrano Núñez

Asesor (a) Externo (a): N/A

Firman conforme lo dispone el Reglamento de Trabajos Finales de

Graduación:



PRESIDENTE (A)

ASESOR (A) EXTERNO (A)



LECTOR (A)



ESTUDIANTE

Dedicatoria

A Dios en primer lugar, por darme la sabiduría y guiarme
para llegar a esta etapa de mi vida.

A mis padres, hermanos y novia por acompañarme a
través de los años.

A toda mi familia, ser parte de mi vida.

A los seres queridos que ya no se encuentran en este
mundo.

Agradecimientos

A Dios por permitirme finalizar esta etapa de mi vida.

A mis padres, por darme las herramientas, consejos y experiencias a través de los años de preparación académica, por ser el ejemplo de superación, dedicación ante las diferentes situaciones que se presentan en la vida

A mis hermanos, por el apoyo y el acompañamiento que me dieron en los años.

A Gloriana, por ser la mejor novia y compañera de vida, que me dio los consejos, fuerzas y paciencia para continuar en los momentos complicados.

A compañeros y amigos, los que hicieron hacer de esta etapa momentos especiales, especialmente a Joseph, David y Daniela.

A mis profesores, por la dedicación y profesionalismo con que enseñan, Kerin Romero por el apoyo y guía en este proyecto, Valeria Serrano por su ayuda en la elaboración del proyecto.

Al Señor Alfredo Gallegos Jiménez, familia y colaboradores, por abrirme las puertas de su empresa y permitirme desarrollar este proyecto.

INDICE DE CONTENIDOS

RESUMEN	13
ABSTRACT.....	14
1. INTRODUCCION.....	15
2. OBJETIVOS.....	17
2.1 Objetivo general	17
2.2 Objetivos específicos.....	17
3. REVISION LITERARIA	18
3.1 Pastoreo en Costa Rica.....	18
3.2 Tipos de pastos en Costa Rica.....	18
3.2.1 Pennisetum Clandestinum (kikuyo).....	18
3.2.2 Cynodon nlemfuensis (estrella)	19
3.3 Manejos del cultivo	19
3.3.1 Fertilización	19
3.3.2 Control de malezas.....	21
3.3.3 Monitoreo y cosecha (pasto).....	21
3.4 Factores que afectan la productividad.....	22
3.4.1 Compactación	22
3.4.2 pH.....	22
3.4.3 Humedad	23

3.5	Agricultura de precisión	23
3.5.1	Reseña histórica	23
3.5.2	Aplicaciones.....	24
3.5.3	Beneficios potenciales	24
3.5.4	Generación de productos.....	25
3.5.5	Modelo de aplicación de agricultura de precisión.....	25
3.6	Fuentes de información en Agricultura de precisión	26
3.6.1	Teledetección remota	26
3.6.2	Uso de sensores en el ámbito agrícola	27
3.6.3	Espectro electromagnético	28
3.7	Índices de vegetación	29
3.7.1	Datos espaciales (componentes, formatos, modelo ráster, modelo vectorial, análisis espacial)30	
3.7.2	Tratamiento de información.....	30
3.8	Correlación estadística e índices de correlación	32
3.9	Valoración económica.....	34
4.	METODOLOGÍA.....	35
4.1	Descripción de la finca.....	35
4.2	Identificación de forrajes.....	35
4.3	Muestreo de suelo.....	35

4.4	Análisis bromatológico de los forrajes.....	36
4.5	Imágenes aéreas.....	36
4.6	Procesamiento de las imágenes	37
4.7	Determinación de Índices de vegetación.....	37
4.8	Correlación en la calidad de forraje vs índices vegetación	38
4.9	Valoración económica.....	41
5.	RESULTADOS Y ANALISIS DE RESULTADOS.....	42
5.1	Muestreo de forrajes.....	42
5.2	Análisis bromatológico	43
5.3	Muestreo de suelo.....	43
5.4	Índices de vegetación	45
5.5	Correlación de datos.....	48
5.6	Generación de mapas	52
5.7	Modelo de gestión de pastoreo.....	60
5.8	Valoración económica.....	62
6.	CONCLUSIONES.....	63
7.	RECOMENDACIONES	65
8.	BIBLIOGRAFIA.....	66
9.	ANEXOS.....	72

INDICE DE TABLAS

Tabla 1. Índices de vegetación del espectro visible RGB.....	38
Tabla 2. Rúbricas de monitoreo semanal.....	41
Tabla 3. Análisis bromatológico de las muestras de forrajes.....	43
Tabla 4. Comparación de datos teóricos con los valores promedio de lectura.....	44
Tabla 5. Datos de bromatológico y análisis físico del suelo.....	44
Tabla 6. Valores promedio de los índices de vegetación relacionados con el análisis bromatológico.	45
Tabla 7. Datos del ANOVA para la proteína.....	49
Tabla 8. Datos del ANOVA para la materia seca.....	49
Tabla 9. Modelos y coeficientes de determinación para la proteína.....	51
Tabla 10 Modelos y coeficientes de determinación para la materia seca.....	51
Tabla 11. Costos de monitoreo semanal.....	62

INDICE DE FIGURAS

Figura 1. Clasificación de longitud de onda.	29
Figura 2. Flujograma del tratamiento de datos.	40
Figura 3. Mapa de la finca con puntos de muestreo y potreros.	42
Figura 4. Mapa del índice RGBVI.	46
Figura 5. Mapa del índice GRVI.	46
<i>Figura 6. Mapa del índice VARI.</i>	<i>47</i>
<i>Figura 7. Mapa del índice GLI.</i>	<i>47</i>
Figura 8. Mapa del índice NGRDI.	48
Figura 9. Gráfico de datos simulados para la proteína.	50
Figura 10. Gráfico de datos simulados para la materia seca.	50
Figura 11. Mapa de proteína con el índice RGBVI.	53
Figura 12. Mapa de proteína con el índice GRVI.	53
Figura 13. Mapa de proteína con el índice VARI.	54
Figura 14. Mapa de proteína con el índice GLI.	54
Figura 15. Mapa de proteína con el índice NGRDI.	55
Figura 16. Mapa de proteína con la combinación de los índices.	55
Figura 17. Mapa de materia seca con el índice RGBVI.	57
Figura 18. Mapa de materia seca con el índice GRVI.	57
Figura 19. Mapa de materia seca con el índice VARI.	58
Figura 20. Mapa de materia seca con el índice GLI.	58
Figura 21. Mapa de materia seca con el índice NGRDI.	59
Figura 22. Mapa de materia seca con la combinación de los índices.	59

Figura 23. Mapa de gestión de pastoreo. 61

INDICE DE ANEXOS

Anexo 1: Análisis bromatológico de forrajes	72
Anexo 2. Análisis bromatológico de forrajes	73
Anexo 3. Análisis bromatológico de forrajes	74
Anexo 4. Mapa de muestro de suelo.....	75
Anexo 5. Punto de muestreo de forraje.....	76

RESUMEN

En los últimos años los costos de producción para cualquier sector han aumentado considerablemente, y en el caso del sector productor de alimentos para la población no es una opción dar un paso al lado, por lo que la única alternativa sería optimizar los recursos para lograr producir sin incurrir en más gastos. En el sector de la ganadería este problema afecta directamente ya que se tiene una alta demanda de recursos externos como lo son los insumos que se necesitan en una finca ganadera incurriendo en una alza en los costos de producción dejando de lado otros aspectos que pueden aportar más al momento de producir como lo son los forrajes y más específicamente la calidad de los mismos, por lo que la implementación de un sistema de monitoreo de pastoreo de precisión a través de teledetección remota el cual busca identificar las cualidades bromatológicas de los forrajes, específicamente en proteína y materia seca, en busca de obtener una gestión de forrajes de calidad. En el presente trabajo se determinó que con el monitoreo pueden obtener forrajes con contenido de porcentajes de materia seca aceptables para cosecha a partir de los 30 días con una pequeña inversión y en un corto tiempo.

Palabras clave: Pastoreo de precisión, monitoreo, forrajes, imágenes RGB.

ABSTRACT

In recent years, production costs for any sector have increased considerably, and in the case of the food production sector for the population, it is not an option to step aside, so the only alternative would be to optimize resources to produce without incurring more expenses. In the livestock sector this problem affects directly because there is a high demand for external resources such as inputs that are needed in a livestock farm incurring a rise in production costs, leaving aside other aspects that can contribute more at the time of production such as fodder and more specifically the quality of them, Therefore, the implementation of a precision grazing monitoring system through remote sensing seeks to identify the bromatological qualities of forages, specifically in protein and dry matter, in order to obtain a quality forage management. In the present work, it was determined that monitoring can obtain forages with acceptable dry matter percentages for harvesting after 30 days with a small investment and in a short time.

Key words: Precision grazing, monitoring, forage, RGB images.

1. INTRODUCCION

Según la ONU (2021), para el año 2050 la población mundial aumentara hasta en 2000 millones de personas, por lo que la inseguridad alimenticia es un tema que cada vez toma más importancia a nivel mundial, sin embargo, la ganadería y la agricultura es una de las claves que no solo contribuye en el seguridad alimentaria, sino también combate a la pobreza y beneficia en el crecimiento económico (FAO, 2022).

En Costa Rica, según el INEC, (2020) se encuentran alrededor de 11000 fincas destinadas a la actividad ganadera, donde cerca del 90% de las fincas utilizan el sistema de producción por pastoreo, el cual consiste en utilizar los forrajes como fuentes de alimento para los animales, sin embargo, tradicionalmente se tiene una dependencia a los alimentos concentrados que son elaborados con cereales importados que brindan los suplementos adicionales que no pueden ser obtenidos por el forraje.

Los forrajes son la base nutricional de fácil acceso que lo animales pueden disponer para producir y reproducirse, siendo también la manera más económica para utilizar como base alimenticia por lo que el papel que desempeña este cultivo en las ganaderías de este país es importante. Sin embargo, en la mayoría de las fincas es una parte que tradicionalmente no se le presta la atención debida ya que solamente se realiza una aplicación de fertilizante estándar sin realmente saber si es la mejor para cada zona de producción.

Por esta razón, es necesario un estudio de las zonas de pastoreo para identificar y sectorizar según los rendimientos de producción de forraje mediante el análisis de suelo acompañado de imágenes aéreas que nos puedan brindar el estado y evolución del cultivo con el fin de encontrar un tipo de correlación de datos para la toma de decisiones de una manera informada.

Al realizar este tipo de análisis se puede brindar a los ganaderos actualizaciones de manera periódica del estado de la finca en las zonas de pastoreo en un menor lapso para lograr llevar al cultivo a un estado óptimo de cosecha.

La ganadería y en especial el ganado de leche, hoy en día invierte al menos en un 50% en la alimentación de los animales (O'neal Coto, 2019), lo que representa una dependencia en los granos importados a nuestro país, generando costos de producción excesivamente altos, ya que en los últimos años los precios de los insumos agrícolas han aumentado alrededor de un 22% en el año 2021 (Banco mundial, 2021).

Para afrontar los retos de aumentar rendimiento tanto productivos como económicos se debe de tener en cuenta la calidad de los forrajes presentes en las fincas de pastoreo y con la finalidad de dejar de depender de los alimentos elaborados con granos, los análisis nutricionales de los forrajes mediante imágenes facilitadas por drones pueden generar una ventaja para los ganaderos, logrando una anticipación de los estados actuales de los pastos momentos previos para la cosecha para la toma de decisiones nutricionales, de manejo y de fertilización (Contexto Ganadero, 2019).

2. OBJETIVOS

2.1 Objetivo general

Implementar un sistema de monitoreo para pastoreo de precisión para la obtención de uniformidad en la calidad al momento de la cosecha del forraje, mediante teledetección remota en finca La Granja ubicada en Pacayas de Alvarado, Cartago

2.2 Objetivos específicos

- Analizar las características de suelo en el que se cultivan los forrajes a través de muestreos físicos para determinar la incidencia en la productividad.
- Evaluar el grado de asocio entre las variables bromatológicas realizadas en ensayo de laboratorio de los forrajes contra los índices de vegetación mediante correlación espacial para establecer el modelo de monitoreo.
- Proponer un modelo de gestión de pastoreo con base a la calidad de los pastos disponibles determinados a partir del modelo de monitoreo elegido para la obtención de uniformidad en la calidad al momento de la cosecha del forraje.
- Realizar una valoración por medio de indicadores económicos para estimar la viabilidad del proyecto.

3. REVISION LITERARIA

3.1 Pastoreo en Costa Rica

El pastoreo es una forma tradicional del manejo del ganado, el cual consiste en que los animales recolecten el alimento que requieren (FAO, 2021).

En Costa Rica, específicamente en la ganadería lechera, se realiza un pastoreo rotacional el cual consiste en realizar apartos o potreros en una finca para que los animales sean conducidos para que consuman el forraje disponible en turnos cortos de tiempo, con el fin de que se coseche el aparto donde se encuentran los animales y los otros en etapa de recuperación (Luisoni, 2010).

3.2 Tipos de pastos en Costa Rica

3.2.1 Pennisetum Clandestinum (kikuyo)

El pasto kikuyo pertenece a la familia de las gramíneas, es apto para zonas frías y se puede ubicar entre las altitudes entre los 1600 a 2200 msnm, suele ser un cultivo perenne y de tamaño mediano, puede llegar a alcanzar alturas de 60 cm sobre el suelo, produce gran cantidad de tallos y estolones lo que permite amplia cobertura del suelo ideal para prevenir erosiones en terrenos con altas pendientes, requiere al menos una precipitación de 1000 mm anuales, por lo que es tolerable a ciertas épocas de sequía (Sánchez-Ledezma & Mesén-Villalobos, 2018).

La calidad del pasto kikuyo a una edad de 28 días de cosechado logra alcanzar rendimientos de 7 Tn materia seca (MS)/ha y con promedios de materia seca (MS) de 20.19%, proteína cruda (PC) 22.62%, extracto etéreo (EE) 3.05%, cenizas de 9.05%, fibra detergente neutra (FDN) 58%, fibra detergente acida (FDA) 29% (Villalobos & WingChing-Jones, 2019)

3.2.2 Cynodon nlemfuensis (estrella)

El pasto estrella es una gramínea perenne, rastrera que posee largos estolones, sus hojas son de tamaño medianas y alargadas (Restrepo Hernandez, 2021), además es uno de los pastos más utilizados en las fincas lecheras para la alimentación de los animales por sus aportes nutricionales y su agresividad y rápido establecimiento sobre la cobertura del suelo.

Según Villalobos & Arce, (2014) el pasto estrella puede alcanzar niveles nutricionales promedio de materia seca (MS) de 23.57%, proteína cruda (PC) 20.27%, extracto etéreo (EE) 2.67%, cenizas de 10.97%, fibra detergente neutra (FDN) 34.95%, fibra detergente acida (FDA) 4.06% lo que representa valores muy prometedores para la producción de leche. Sin embargo, estos valores son sujeto la edad del pasto, horas luz de exposición y cambios climáticos, además de también puede verse afectado la producción de la biomasa. Este pasto presenta los mejores valores de proteína bruta (PB) y digestibilidad en etapas tempranas de su desarrollo, entre los 30 y 42 días de cosechado.

3.3 Manejos del cultivo

3.3.1 Fertilización

Los pastos son cultivos perennes, sin embargo, su ciclo de cosecha es muy corto, alrededor de 30 días desde su cosecha anterior, por esta razón requiere y demanda una gran cantidad de nutrientes para llegar a alcanzar su punto más alto en calidad y rendimiento, por consecuente su fertilización es indispensable para conseguirlos.

La fertilización para este cultivo se realiza de forma diferencial dependiendo de la etapa de crecimiento en la que se encuentre, los elementos más demandantes para las pasturas son nitrógeno (N), potasio (K) y fósforo (P), donde la etapa de siembra requiere el fósforo para obtener energía,

en la etapa de crecimiento su demanda de N es alta y en mitad del desarrollo para alcanzar un mayor de forraje y crecimiento el K es el que mejor aporta.

El rol que ejerce cada uno de estos macroelementos en los pastos lo describe Pezo & Garcia (2018) a continuación:

El nitrógeno en la etapa de crecimiento actúa en la síntesis de clorofila lo que permite el color verde, la clorofila es proceso esencial en la fotosíntesis, es componente básico de las proteínas vitaminas y enzimas, favorece la división celular por lo que aumenta la biomasa aérea y radicular, mejora la concentración proteica y la resistencia a plagas y enfermedades. Por lo que el déficit de este presenta problemas de crecimiento, presencia de amarillamiento en las hojas y pastos con baja concentración de proteína.

El fósforo se considera el segundo macroelemento en importancia por la frecuencia en la que detectan las bajas concentraciones, ya que mayormente se encuentra de forma orgánica como los fosfatos de hierro (Fe) y aluminio (Al) de baja solubilidad no aprovechables para las plantas, el P participa en los procesos metabólicos como energía en forma de ATP, fotosíntesis, glicolisis, respiración y síntesis de ácidos grasos y proteína. También favorece al desarrollo radicular, aumenta el número de rebrotes, es catalizador para la formación de semillas e incrementa la resistencia a las enfermedades.

El potasio interviene en los procesos metabólicos por lo que ayuda en la absorción de los nutrientes, respiración y evapotranspiración. Además, participa en la regulación osmótica e hídrica lo que le da cierta resistencia ante eventos de sequías y heladas, también es un catalizador de enzimas de la síntesis de proteína y el metabolismo de carbohidratos, asimismo ayuda en la fijación atmosférica del nitrógeno.

Por otra parte, también se realiza una incorporación de materia orgánica mediante la dispersión de la excretas que realizan los animales cuando se encuentran en los potreros para realizar un aprovechamiento de este material, además de que el pasto que crece en donde se encuentra la excreta no es consumida, a esta acción se le conoce como paleteo de las excretas (Sánchez-Ledezma & Mesén-Villalobos, 2018).

3.3.2 Control de malezas

Si bien los forrajes de pastoreo son invasivos y cubren gran parte de la cobertura del suelo, cuando se realiza un sobrepastoreo se abre la posibilidad del desarrollo de otra clase que plantas consideradas malezas para los pastos, este control se puede realizar de manera manual, mecánica o químico localizado, cada uno de estos métodos se realizan después de la cosecha, sin embargo, la propagación de las malezas se puede impedir evitando la dispersión de las semillas o rastrojos de las mismas (Sánchez-Ledezma & Mesén-Villalobos, 2018).

3.3.3 Monitoreo y cosecha (pasto)

La cosecha de los pastos se realiza mediante el pastoreo rotativo el cual consta en un periodo de rotación de 30 días por los tipos de forraje que se manejan, en ese punto los pasto alcanzan su punto más alto a nivel nutricional. El sistema de pastoreo rotacional trata de que los animales pastoreen dos potreros diarios, uno después de cada tiempo de ordeño por lo que existen periodos de descanso y ocupación (Sánchez-Ledezma & Mesén-Villalobos, 2018). Al trabajar rotaciones de 30 días y que se ocupan o pastorean dos diarios, una finca debe de disponer de al menos 60 potreros destinados para la parte productiva.

Al realizarse este sistema intensivo de pastoreo se debe de tener en cuenta que al final de la cosecha, debe de sobrar al menos una altura de 15 cm de forraje para que este pueda regenerarse de manera adecuada esto se alcanza evitando sobrepastoreo.

3.4 Factores que afectan la productividad

Los forrajes dependen de los suelos en mayor parte ya que en ellos es donde encuentran sostén y nutrientes para su desarrollo, sin embargo, los suelos deben de tener ciertas características físicas y químicas que pueden beneficiar y perjudicar el crecimiento y la producción de este tipo de plantas, estas características se pueden presentar como factores intrínsecos o cuantificables del suelo los cuales los factores más comunes que se perciben son.

3.4.1 Compactación

La compactación del suelo no solo se genera por el paso de maquinaria pesada, sino también por el pisoteo de los animales por el pastoreo, esta compactación se forma en los horizontes superiores del suelo afectando la producción de los forrajes. Las compactaciones que puede sufrir el suelo puede depender del peso de los animales que transiten por el sitio donde las presiones de ejercidas por un bovino pueden estar entre los 98-192 KPa de presión estática, y también depende del nivel de humedad presente en el suelo al momento del pastoreo ya que cuando se encuentra seco la compactación se asocia a la pérdida de macroporosidad, por otra parte, cuando se encuentra en un estado húmedo, la compactación se genera donde el animal coloca la pesuña dejando el suelo en un estado de compactación y de lodo (Medina, 2016). No obstante, Bacigaluppo & Gerster (2017) describen que el manejo de las gramíneas tienen la capacidad de recuperar en cierta medida la estructura del suelo por los efectos que tienen las raíces y los procesos de humectación lo cual permite restaurar la porosidad de los suelos, sin embargo, estos efectos pueden tardar varios años en dar resultados.

3.4.2 pH

El pH influye directamente en los procesos de la absorción de los nutrientes presentes en los suelos por las plantas, por lo que, este factor tiene gran relevancia en los suelos agrícolas, por

esta razón este factor debe ser monitoreado y controlado, el Ph optimo en los suelos debe de entre el valor de 6.5 y 7.5, buscando la neutralidad para que micro y macronutrientes sean asimilados con facilidad (Catalán Salas, 2016).

3.4.3 Humedad

Los forrajes al igual que otros cultivos pueden experimentar diferentes niveles de estrés hídrico dependiendo del contenido de humedad presente en su entorno, sea ambiental o en el suelo, la producción de los forrajes depende de diversos aspectos con respecto al nivel de estrés hídrico al cual estén expuestos, estos aspectos son: la turgencia de los tejidos, los procesos metabólicos, reacciones bioquímicas, absorción de nutrientes y el traslado de sustancias orgánicas e inorgánicas, lo cual se ve reflejado en la producción de materia seca, producción foliar y producción de raíces (Atencio et al., 2014).

3.5 Agricultura de precisión

La agricultura de precisión (AP) corresponde a la integración de técnicas, ciencia y tecnología con el fin de optimar la producción de los cultivos mediante la recolección e interpretación de datos espaciales y temporales de las zonas cultivables para la evaluación y predicción de los cultivos, lo cual accede a la toma de decisiones exactas para el incremento en los rendimientos y así mismo el control y evaluación de las zonas productivas (IICA, 2016).

3.5.1 Reseña histórica

La AP dio sus primeros pasos en los Estados Unidos en la década de los 80's con el fin de la administración de cultivos extensivos en los cuales la asistencia a los mismos se diera a través de elementos digitales como computadoras para manejar sistemas diferenciados de manera automática (Universidad de Antioquia, 2021).

El desarrollo que ha tenido la AP se le conoce como la cuarta revolución industrial o agricultura 4.0 debido al alto desarrollo tecnológico que ha tenido este campo en la agricultura, estos avances comprenden desde los sistemas de posicionamiento global (GPS), sensores remotos, drones, aviones teledirigidos y softwares agrícolas para nombrar unos ejemplos que permiten monitorear los rendimientos a través de mapeos de las áreas productivas.

3.5.2 Aplicaciones

Los modelos de AP permiten realizar ajustes según las variabilidades de las zonas productivas con la finalidad hacer las aplicaciones de siembra, fertilización, riego u otros insumos necesarios para los cultivos, con el objetivo de disminuir los costos de producción al evitar realizar un manejo uniforme sobre todo el terreno, como ejemplo una de las aplicaciones más usuales es el manejo y control de malezas, en donde se registra donde se encuentra la presencia con mayor abundancia y se aplica la cantidad y dosis necesaria de herbicidas para eliminarla (Orno-badia, 2018).

3.5.3 Beneficios potenciales

La agricultura de precisión se puede definir según la rama en la que se busca desarrollar, desde la tecnología, producción y hasta la perspectiva económica, sin embargo, todas las ramas de las AP se integran para el bien de los productores generando una serie de ventajas que expone Valdés Conroy (2017):

- Aumento en los rendimientos con el fin de reducir las inestabilidades nutricionales que requieren los cultivos con el uso eficiente de los insumos.
- La seguridad alimentaria tendría una garantía al aumentar de manera efectiva los rendimientos de producción.

- Sanidad agrícola de debe al constatare monitoreo de los cultivos, así se podrá establecer el comportamiento que opte ante las incidencias de plagas y enfermedades.
- El impacto ambiental será en menor medida debido a los beneficios por el hecho que al aumentar los rendimientos de las zonas productivas no va a estar la necesidad de la expansión, además de que va a haber disminuciones en las aplicaciones de agroquímicos que ocasionan contaminación de aguas y suelos aparte del uso racional de las fuentes de agua para el uso de riego.

3.5.4 Generación de productos

A partir de los datos recolectados de las áreas de producción se pueden generar campos de monitoreo y mapas de rendimientos lo que ofrece la información detallada sobre la productividad en sitio de manera actualizada, con esta información compilada se pueden establecer parámetros los cuales sirven a actuar y corregir ciertas circunstancias en la cuales la producción sea baja.

3.5.5 Modelo de aplicación de agricultura de precisión en pastos

Los modelos de agricultura de precisión se utilizan en las actividades productivas con animales, da paso a la relación de planta-animal, pues el factor activo productivo recae sobre el animal, sin embargo, la producción que se obtiene depende directamente del alimento que percibe. Actualmente esta relación está tomando relevancia por el desarrollo que ha tenido el desarrollo de las AP, y de acuerdo con Echeverri (2022) los ganaderos deben ser agricultores de pastos, pues estos le prestaban mayor importancia a la cantidad que a la calidad de los forrajes.

A partir de este punto es donde se realiza un manejo diferenciado en la calidad de los pastos dependiendo el propósito para el cual está destinado su fin, pues no es el mismo requerimiento para animales en desarrollo como para los productivos, por lo que la ganadería con un sistema de

pastoreo con AP logra identificar la heterogeneidad de los alimentos con el fin de aumentar las producciones.

3.6 Fuentes de información en Agricultura de precisión

3.6.1 Teledetección remota

La teledetección es la técnica de obtener información de las superficies a través de sensores que se encuentran a cierta distancia del objeto de estudio, estos sensores se pueden instalar en satélites, plataformas espaciales o también sobre vehículos aéreos no tripulados VANT (mayormente conocidos como drones) los cuales captan información por la interacción electromagnética que se lleva a cabo entre el terreno y los sensores para después ser procesada en información apta para ser interpretada (IGN, 2018). Los sensores de teledetección se pueden clasificar en pasivos los cuales miden la radiación que proviene de a un agente externo al sensor como la luz solar reflejada por lo que solo pueden ser utilizada durante el día y los sensores activos son lo que usan una fuente de radiación propia con esto se pueden utilizar de día y de noche.

Los sensores remotos pasivos son lo que se utilizan para la obtención de información a través de imágenes tomadas las cuales varían según su resolución, esta resolución está definida por la distancia a la que es tomada la imagen y es representada por el tamaño del pixel, una imagen satelital por ser obtenida a una gran altura de la superficie las dimensiones de los pixeles suelen ser grandes por lo que la resolución es pobre por lo que son utilizados en grandes extensiones porque su visibilidad en los detalles es baja, por otra parte, sensores instalados en drones pueden obtener información más precisa por que se realiza la captura de la imagen a alturas menores que los satelitales por lo que el tamaño del pixel es menor pudiéndose hacer énfasis a áreas específicas las cuales se pueden representar mayor interés al análisis.

Estos sensores también trabajan las resoluciones espectrales, lo que indica el número y ancho de las bandas a las cuales se están capturando por la radiación electromagnética, entre más bandas captadas es mejor pues estas caracterizaran la superficie, por lo general y lo más usual es de 3 bandas, el espectro RGB (rojo, verde y azul por su siglas en inglés) (UNCPBA, 2012).

3.6.2 Uso de sensores en el ámbito agrícola

La agricultura ha tenido avances tecnológicos con el fin de potencializar las producciones realizando un uso eficiente de los recursos con los que se cuentan, por lo que es relevante el conocimiento de los entornos para monitorear, predecir y optimizar insumos, gestión y producción. Estas acciones se logran a través de sensores los cuales captan información de parámetros físicos que se encuentra en el entorno y la convierten en información que puede ser medida, como por ejemplo en agricultura se usan sensores climáticos los cuales captan información de temperatura, precipitación, humedad relativa, radiación y velocidad del viento, sensores de seguimiento del cultivo como humedad del suelo, CO₂, conductividad hidráulica, riego, pH, entre otros, pero estos sensores deben de ser colocados en los campos productivos para que puedan captar estos parámetros. Sin embargo, existe otro tipo de sensores que logran captar información a distancia del área de estudio y a estos se les conoce como sensores remotos.

Los sensores remotos permiten obtener información sin estar en contacto con el objeto por lo que se requiere el uso de algún tipo de plataforma sea satélite, avión, vehículos aéreos no tripulados (VANT) o vehículos terrestres que permitan realizar una cobertura del lugar que se desea captar (Guzman-Alvarez et al., 2022). En el campo agrícola el uso de los sensores se ha centrado en cámaras especializadas instaladas en los VANT para la recopilación de datos, estas cámaras extraen información de investigación para el desarrollo fenológico, estrés hídrico o las necesidades hídricas de los cultivos a través de la temperatura del cultivo (Instituto Nacional de

Investigaciones Forestales, 2022). En términos generales estos tipos de sensores miden la radiación electromagnética que es reflejada por un objeto, en este caso las plantas, obteniendo como resultados datos de los estados de los cultivos a partir de su reflectancia.

3.6.3 Espectro electromagnético

El espectro electromagnético corresponde a la radiación electromagnética que absorbe o emite un cuerpo, este tipo de radiación es específica para cada tipo de cultivo. Dentro del espectro existen varios tipos donde se clasifican según la longitud de onda de cada uno, según (Luque Ordóñez, 2012) establece la siguiente categorización de la radiación:

- Ondas subradio
- Ondas radioeléctricas
- Microondas
- Rayos T
- Rayos infrarrojos
- Luz visible
- Rayos ultravioletas
- Rayos X
- Rayos gamma
- Rayos cósmicos

Cada longitud de onda de la categoría anterior disminuye con forme la frecuencia aumenta por lo que no todas las ondas son perceptibles, en realidad, la luz o el espectro visibles es perceptible ante el ojo humano, este espectro cubre todos los colores desde 400 nm al rojo 700 nm. En la figura 1 se representa la clasificación de las ondas según su longitud de onda.

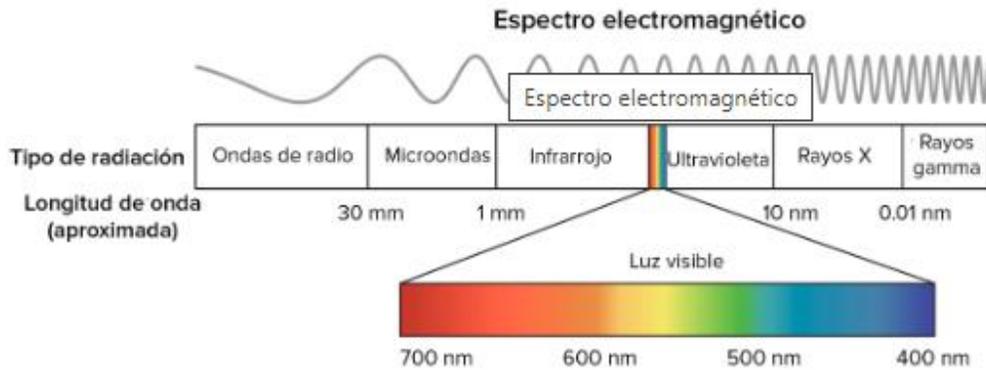


Figura 1. Clasificación de longitud de onda.

3.7 Índices de vegetación

Los índices de vegetación corresponden a los parámetros calculados a partir de los valores de reflectancia a distintas longitudes de ondas y las cuales son sensibles a las cubiertas vegetales (Muñoz, 2013). Estos índices trabajan a través de imágenes multibandas, las que deben ser categorizadas y agrupadas para poder identificar las zonas productivas realizando una separación del suelo y la vegetación, asignándoles valores desde las zonas con menos vigorosas hasta las más vigorosas.

Tradicionalmente para los índices de vegetación se utilizan los equipos de cámaras multiespectrales los cuales manejan diferentes bandas como la del infrarrojo cercano para el uso de ciertos índices como lo son el NDVI que es utilizado frecuentemente para estimaciones de biomasa vegetal, sin embargo, esto genera un costo elevado por la adquisición de estos sensores más avanzados, pese a esto Marín et al. (2020) y García-Martínez et al., (2020) utilizan de una forma alternativa de bajo costo que involucra índices de vegetación a partir de imágenes digitales convencionales del espectro visible de RGB los cuales han sido utilizados para estimaciones para

las estimaciones de los colores de los cultivos, porcentajes de cobertura, predicciones de rendimiento de cultivos, deficiencias de nutrientes e impacto de enfermedades.

3.7.1 Datos espaciales (componentes, formatos, modelo ráster, modelo vectorial, análisis espacial)

Los índices de vegetación con imágenes de RGB se obtienen a partir de capas ráster, las cuales están compuesto de matrices de píxeles que representan condiciones e información continua de un lugar o zona deseada, en donde cada píxel representa una pequeña área de la zona, según sea su resolución, entre mayor resolución el área de cada pixel es menor, los ráster se presentan como imágenes multibandas las cuales se pueden separar (QGIS, 2022).

Así como las capas ráster se utilizan para el uso de imágenes, están las capas vectoriales las que pueden contener información espacial de objetos los cuales se les pueden asignar, las mismas capas ráster se pueden transformar en capas vectoriales.

3.7.2 Tratamiento de información

El tratamiento de la información se realiza a partir de un sistema de información geográfica (SIG) lo que permite realizar trabajos en una posición geográfica lo que posibilita la captura, almacenamiento, lectura, análisis y gestión de resultados de datos espaciales con el fin de crear modelaciones o simulaciones para anticiparse ante situaciones específicas (Solano Mayorca, 1993), además, los SIG como menciona Olaya, (2020) se compone de la integración de software y hardware que están diseñados para trabajar con datos georreferenciados con coordenadas espaciales.

El manejo de la información de SIG ha sufrido un avance significativo debido a que anteriormente se manejaba de manera en papel lo que implicaba una transformación para maneja

a manera de SIG, pero con la ayuda de la tecnología se ha logrado un manejo conjunto a través de datos espaciales, pero, antes de realizar cualquier análisis se debe aclarar que los datos espaciales son la materia prima para cualquier proceso, pues estos poseen características propias de posición las que se expresan como coordenadas (Olaya, 2020).

El manejo de los datos espaciales se puede almacenar en dos formas de capas: ráster y vectorial, los ráster son utilizados para capas continuas representadas en mallas que priorizan la propiedad del espacio que la precisión de la localización, estos utilizan como unidad de menor información el pixel pero, el tamaño de este va a inferir directamente con la precisión o el detalle que pueda presentar el espacio y su almacenamiento es de un solo valor único, por otra parte, está el vectorial que cuyo valor diferencia es la precisión de la localización de los diferentes elementos y su almacenamiento no se limita a un solo valor, puede albergar diferentes características en el mismo punto como atributos lo que permite el manejo de múltiple de información (Fallas, 2010).

Con el uso de las capas se pueden generar una estructura conocida como algebra de capas que se pueden trabajar con capas vectoriales, sin embargo, se hace más referencia al desarrollo sobre las capas ráster pues estas poseen estructuras regulares y son más adecuadas en el planteo de algoritmos y formulaciones, aunque este término también se le puede conocer como calculadora de mapas pues se puede construir a partir de otros mapas para obtener nuevos resultados geográficos (Olaya, 2020).

Para la ejecución de los mapas se necesita contar con información en la totalidad del área de estudio esto se puede llegar mediante el proceso de la interpolación la cual consiste en estimar atributos a partir de datos conocidos que se obtienen al extraer puntos de muestreo con datos reales, los cuales es importante la localización, la cantidad y la buena distribución de estos para contar con información consistente para la interpolación. La interpolación se puede clasificar en globales

que utilizan todos los datos disponibles para las predicciones, locales que solo utilizan los datos más cercanos al punto que se quiere estimar, pero también pueden ser determinísticos que no facilitan estimaciones de error en la interpolación y estocásticos que si permiten conocer la precisión de las estimaciones por varianzas estimadas (Navarro et al., 2011)

3.8 Correlación estadística e índices de correlación

Villón Bejar (2006) define la correlación estadística como “la asociación entre 2 o más variables aleatorias, que explica sólo parcialmente la variación total de una variable aleatoria, asociando a otra variable aleatoria mediante una ecuación de asociación” (p. 264), y la otra parte de la variación no explicada se deben a errores no tomados en cuenta.

Sin embargo, no en todos los casos se puede correlación las variables una a una, y se tienen que incluir más variables independientes para determinar la variable dependiente y a esto se lo conoce como correlación de variable múltiple donde Cadenas Anaya & Guaita (2021) indican que la regresión lineal múltiple “permite establecer una relación entre la variable dependiente y un conjunto de variables independientes que a diferencia de la simple, esta se puede aproximar más a las situaciones de análisis real que, directa o indirectamente, participan en la concreción” (p. 109).

Cuando se utiliza la correlación múltiple se obtienen los estadísticos de bondad de ajuste los cuales corresponden a coeficiente de correlación múltiple (múltiple R), coeficiente de correlación múltiple al cuadrado o coeficiente de determinación (R^2) y el análisis de varianza (ANOVA).

Cadenas Anaya & Guaita (2021) explica los resultados a partir de un análisis de la regresión múltiple lineal a continuación:

- Los coeficientes del múltiple R oscilan entre 1 y -1, donde los valores más cercanos a 1 tienen una asociación positiva, que a medida que estos aumenten, la variable dependiente también aumentara; y los valores más cercanos a -1 representa una asociación negativa, que a medida que los valores aumenten, los valores de la otra disminuyen. Y si los valores se aproximan al valor del 0, indica que entre las variables no existe asociación lineal y no sería necesario continuar con el modelo de regresión lineal.
- El coeficiente de determinación (R^2) mide la proporción de la variabilidad de la variable dependiente explicadas por la variable independiente que sea incluida en el proceso, lo cual indican la importancia que llega a tener en el proceso de predecir la variable dependiente.
- El ANOVA se puede separar en 2 componentes donde uno es la variabilidad explicada por la regresión y la variabilidad residual. El ANOVA se expresa en una tabla donde indica un valor de F, donde se puede contrastar la hipótesis nula (H_0) de que R^2 es igual a 0, es decir, que se rechaza la hipótesis de que dos variables están correlacionadas. También presenta el p-valor o también conocido por el valor crítico de F, donde si este valor es menor que el de significación (usualmente de 0.05), se rechaza la hipótesis nula planteada y se acepta la H_1 o alternativa.

3.9 Valoración económica

Según Pérez-Salas Segrera et al., (2016) los factores que afectan las granjas ganaderas en el mundo son: riesgo en la producción, la variabilidad de los precios en los insumos, las nuevas tecnologías, nuevas legislaciones y el cambio en las preferencias en los consumidores. Lo que obliga a los productores en busca de nuevas formas de aumentar de manera eficiente, rápida y real las producciones. Por lo que es indispensable sacar el máximo provecho de recursos que poseen las fincas.

Costa Rica es un país que maneja en gran parte los sistemas de ganadería en sistemas de pastoreo, por lo que las producciones a nivel económico depende del consumo de forraje que puedan acceder los animales, por lo que, se debe de prestar suma atención a los sistema que favorecen a la toma de decisiones en gestión de forrajes mediante monitoreos consecutivos que permitan mantener un balance optimo en crecimientos de las pasturas, consumo de los animales en calidad y cantidad (Opio et al., 2022).

Por lo que el realizar este tipo de actividades de monitoreo requiere de equipo y mano de obra especializada para toma, tratamiento, interpretación y entrega de datos y resultados por lo que se deben de conocer la legislación en cuanto a los costos de las herramientas y los colaboradores. En Costa Rica el Ministerio de Trabajo y Seguridad Social se encarga de velar por las jornadas laborales de los colaboradores, las cuales no deben de ser más de 8 horas de diarias, con un máximo de 6 días a la semana, además también establece los salarios mínimos por lo que se deben a cada ocupación o cargo.

4. METODOLOGÍA

4.1 Descripción de la finca

El presente estudio se realizó en finca La Granja ubicada en Pacayas del cantón de Alvarado, Cartago, ubicada a unos 1750 m.s.n.m, la cual se dedica a la ganadería lechera, esta finca cuenta con un aproximadamente 10 ha que se encuentran sembradas de forraje el cual está destinado para alimentación de los animales. La finca cuenta con 60 animales productivos anualmente y 25 animales en crecimiento y desarrollo. La finca maneja un sistema de pastoreo rotativo para el ganado lechero en un área de 8.6 ha, dividida en dos turnos diarios, con un total de 67 apartos o potreros, los que están distribuidos en 32 para el turno de la mañana y 35 para el turno de la tarde. El estudio realizado fue durante los meses de agosto, septiembre y octubre en los cuales está presente la época lluviosa.

4.2 Identificación de forrajes

La finca al manejar un sistema de pastoreo rotativo acelerado debe de tener especies de forrajes que se adapten a ese tipo de sistema, donde alcancen un crecimiento, desarrollo y maduración en un corto tiempo, por lo que cuenta con las variedades de estrella (*Cynodon nlemfuensis*) y kikuyo (*Pennisetum clandestinum*).

4.3 Muestreo de suelo

Se realizaron muestreos físicos del suelo con el fin de establecer factores que puedan afectar la producción de forrajes, estas medidas involucraban la resistencia a la penetración, humedad volumétrica y grado de acidez del suelo (pH).

Los equipos utilizados para los muestreos fueron: para la resistencia de la penetración se utilizó el Penetrologger con GPS Eijkelkamp Penetroviewer 6.0, para la humedad volumétrica se realizó con el Kit de lectura instantánea de humedad del suelo MPKit y para el pH se efectuó con el soil tester de Veroyi

4.4 Análisis bromatológico de los forrajes

Se extrajeron muestras representativas de forrajes de diferentes edades de los potreros para poder determinar la calidad nutricional de los forrajes, este muestreo se realizó de manera manual el cual se cortó todo el largo de los tallos y hojas para analizarlo en el laboratorio. Se marcaron los puntos donde se realizaron los muestreos para localizarlos en un mapa y tomar un radio de 25 m a la redonda para tomar un área representativa.

Los métodos utilizados en el laboratorio para los análisis fueron:

- a) Proteína, fibra ácido D, fibra ácido neutra D, extracto etéreo, cenizas y lignina: método de espectroscopia infrarroja cercana (NIR), usando infraxact, FOSS.
- b) Materia seca: gravimetría, usando horno a (60-70) °C por 48 h y horno a 135 °C, durante 2 h.

4.5 Imágenes aéreas

Para la obtención de las imágenes aéreas se utilizó el dron AUTELEVO II Pro, con cámara de 20 MP y sensor CMOS de 1", con una inclinación vertical de 90°. Los vuelos se realizaron a una altura de 100 m de altura desde el punto de partida, alcanzando una altura máxima de 160 m en el punto más bajo de la finca.

4.6 Procesamiento de las imágenes

Del proceso anterior se obtuvieron un total de 249 imágenes que se cargaron el software Dronedeploy para realizar el ortomosaico el cual posee una resolución por píxel de 2.7 cm y al exportarlo la resolución por píxel es de 50 cm.

4.7 Determinación de Índices de vegetación

A partir del ortomosaico se calcularon los índices de vegetación en el software Qgis y posterior en el software SAGA se transformaron de formato .tif a .shp con el fin de realizar una intersección entre los índices, los valores de la calidad de los forrajes y la información recolectada de las muestras de los suelos.

Los índices utilizados estaban compuestos por las bandas del espectro visible RGB, los cuales se representan en la tabla 1.

Tabla 1. Índices de vegetación del espectro visible RGB.

Nombre	Formula	Fuente
Green-red vegetation index (GRVI)	$GRVI = \frac{(R - G)}{(R + G)}$	(Bendig et al., 2015)
Red-green-blue vegetation index (RGBVI)	$RGBVI = \frac{(G - (R * B))}{(G * G) + (R + B)}$	(Barbosa et al., 2019)
Green leaf index (GLI)	$GLI = \frac{((G - R) + (G - B))}{((2 * G) + R + B)}$	(Barbosa et al., 2019)
Visible atmospherically resistant index (VARI)	$VARI = \frac{(G - R)}{(G + R - B)}$	(García-Martínez et al., 2020)
Normalized green-red difference index (NGRDI)	$NGRDI = \frac{(G - R)}{(G + R)}$	(Lussem et al., 2018)

4.8 Correlación en la calidad de forraje vs índices vegetación

La correlación utilizada para este modelo fue de variable múltiple, por lo que, se realizó a partir del método ANOVA, que permite utilizar diferentes variables independientes que en este caso se componen de los índices de vegetación y los días de crecimiento de los forrajes.

El análisis se basó en tomar los datos promedio de las interpolaciones de los índices de vegetación y comparándolos con los datos de la calidad del forraje que presento el análisis de laboratorio, con el propósito de obtener una tabla resumen en la cual se pudiera realizar el ANOVA para obtener los valores de F, valor critico de F para poder aceptar o rechazar la hipótesis nula, además de conseguir los grados de libertad y los coeficientes para construir las ecuaciones para generar el modelo de simulación y determinar los valores de los porcentajes de la calidad, para

este método se realizó mediante el software Excel que permite el análisis estadístico y la graficación respectiva.

En la figura 2 se presenta el flujograma como fue la toma, el tratamiento y la presentación de los datos.

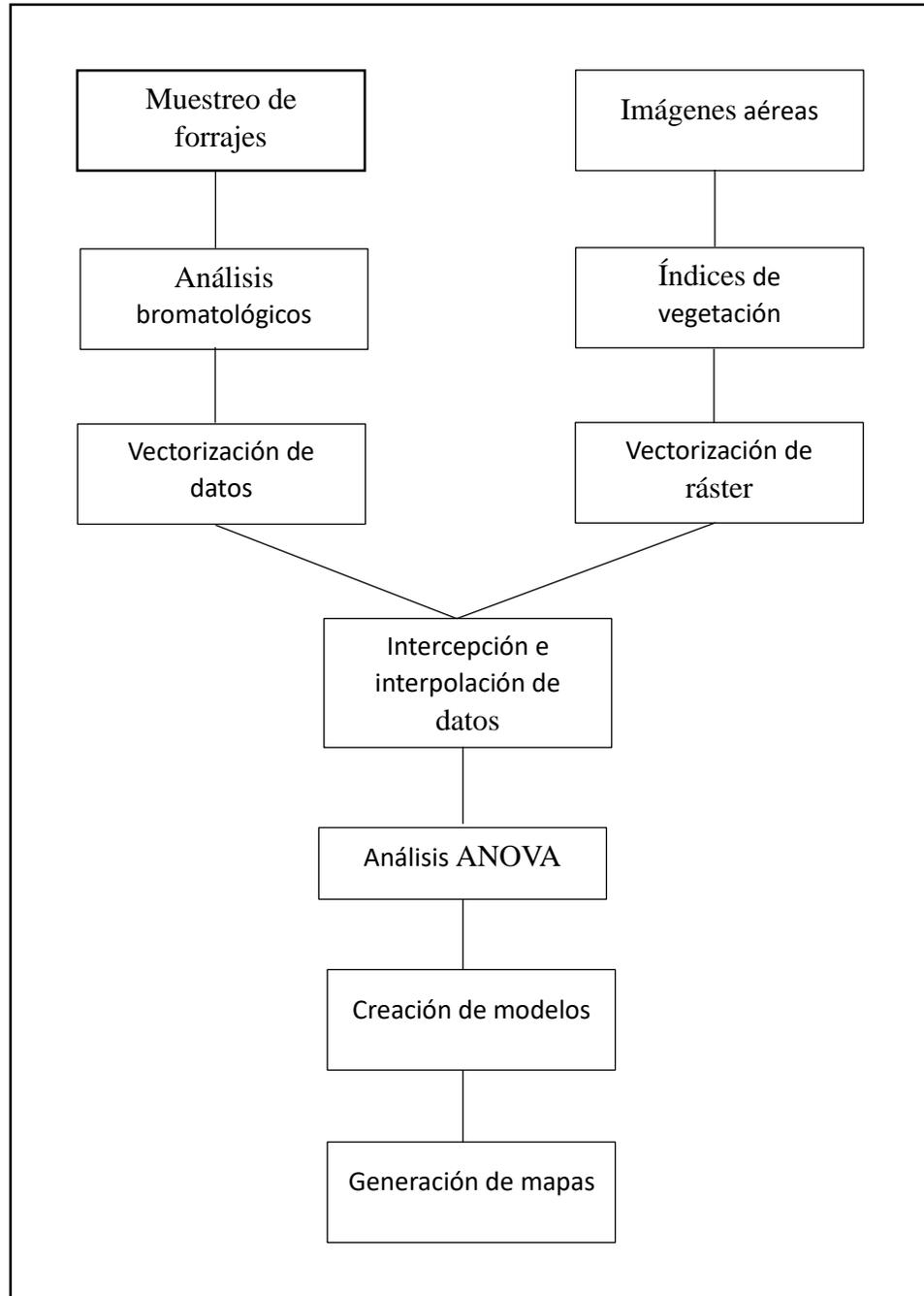


Figura 2. Flujo de datos del tratamiento de datos.

4.9 Valoración económica

Consiste en el costeo de llevar a cabo el trabajo de monitoreo con una periodicidad semanal, desde el levantamiento en la captura de imágenes, procesos de información y el procesamiento de los datos, la tabla 2 presenta como se realiza el análisis de esta valoración.

Tabla 2. Rúbricas de monitoreo semanal.

Descripción	Costo	Costo semanal
Drone	Equipo total / 3 años de vida útil	Costo anual /52 semanas
Software	Licencia anual	Licencia anual /52 semanas
Vuelo	Personal técnico	1 día
Procesamiento	Personal técnico	1 día
		Total

5. RESULTADOS Y ANALISIS DE RESULTADOS

5.1 Muestreo de forrajes

Se realizo un muestreo de forraje en la finca, como se muestra en el anexo 5, con la finalidad de realizar un análisis bromatológico, los cuales estaban diferenciados por la cantidad de días y los turnos de pastoreo que correspondían a 25 y 30 días, los puntos de muestreo se identifican en la figura 3 del mapa general de la finca con las divisiones de los potreros.

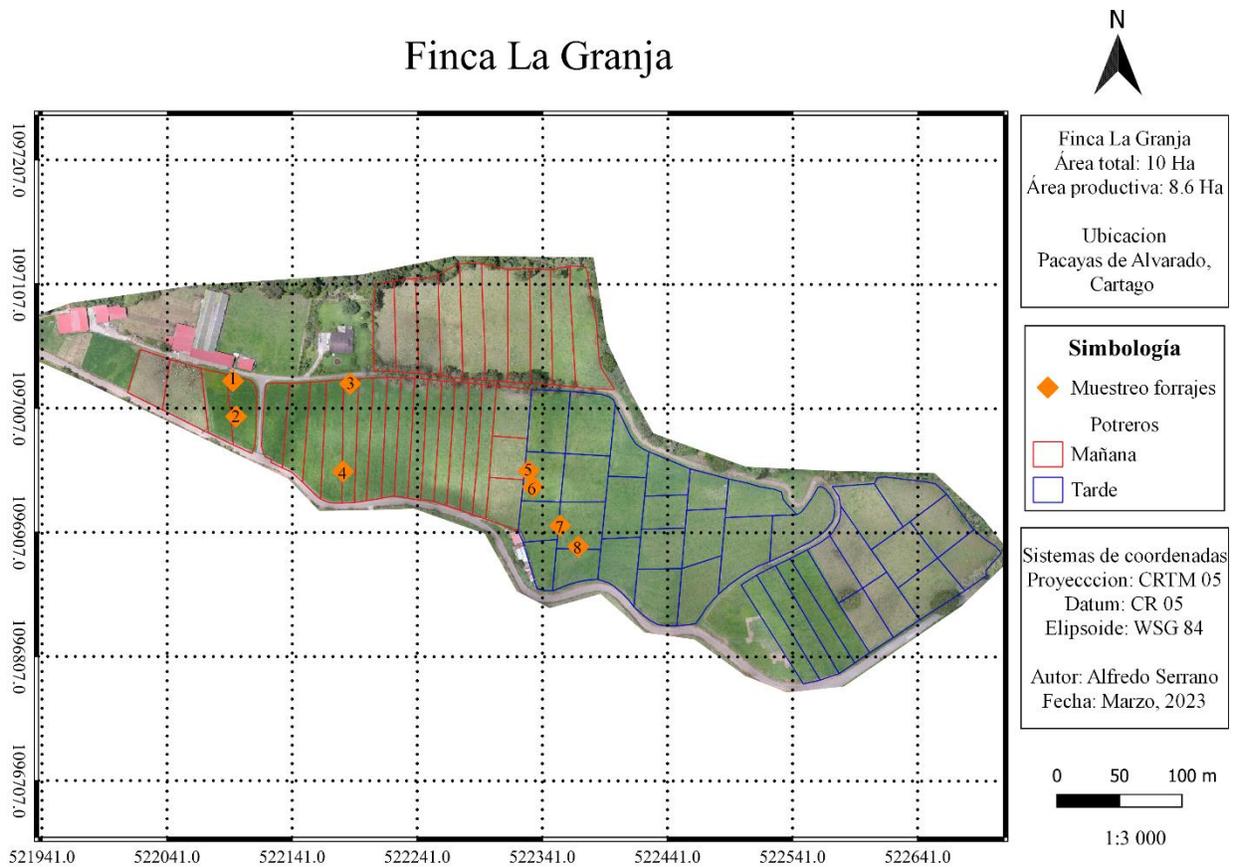


Figura 3. Mapa de la finca con puntos de muestreo y potreros.

5.2 Análisis bromatológico

Los análisis bromatológicos se realizaron mediante los laboratorios de la Cooperativa de productores de leche Dos Pinos R.L, los que informan datos de la composición nutricional como materia seca, cenizas, fibras detergentes proteína, etc. Los análisis completos se presentan en los anexos 1, 2 y 3. Sin embargo, los datos de interés son los de materia seca y proteína.

Los valores promedios para las muestras de 25 días de porcentaje materia seca es de 15.82 y porcentaje proteína de 22.17 y los valores de promedio para las muestras de 30 días son de porcentaje materia seca 16.52 y porcentaje proteína de 21.95, los datos específicos de este análisis se presentan en la tabla 3.

Tabla 3. Análisis bromatológico de las muestras de forrajes.

Muestra	% Mat Seca	% Proteína	Días
1	14.6	21.4	25
2	15.2	24.4	25
3	16.5	20.3	25
4	17	22.6	25
5	14.9	21.9	30
6	15.9	22.7	30
7	17.5	22.7	30
8	17.8	20.5	30

5.3 Muestreo de suelo

También se realizaron muestreos físicos del suelo en toda la finca como se muestra en el anexo 4, por lo que mediante la interpolación con los datos del bromatológico se determinaron las características físicas que puedan afectar la producción del cultivo, los cuales se comparan en la

tabla 4 los valores teóricos de cada aspecto con los valores promedios obtenidos en los muestreos.

Además, los datos específicos de las características se presentan en la tabla 5.

Tabla 4. Comparación de datos teóricos con los valores promedio de lectura.

	Bajo	Aceptable	Alto	Lectura
Resistencia a la penetración	0 - 1.0	1.1 - 2.0	< 2	1.0
% HV	> 50	50 - 60	< 60	54.6
pH	> 6.4	6.5 - 7.5	< 7.6	7.7

Tabla 5. Datos de bromatológico y análisis físico del suelo.

Muestra	% Materia		%		Resistencia penetración (Mpa)
	Seca	Proteína	%HV	pH	
1	14.6	21.4	54.4	7.7	1.0
2	14.9	21.9	53.5	7.6	1.0
3	15.2	24.4	51.9	7.8	1.1
4	15.9	22.7	53.9	7.6	1.0
5	16.5	20.3	55.5	7.8	1.0
6	17	22.6	54.2	7.8	1.1
7	17.5	22.7	55.8	7.8	1.0
8	17.8	20.5	57.2	7.9	1.0

Los valores de los datos presentes en la tabla anterior, refleja que el estado de la finca es óptimo para la producción de forrajes según las características que demandan los tipos de pastos presentes en la zona.

5.4 Índices de vegetación

Con base a las imágenes aéreas y aplicando las fórmulas de los índices de vegetación de la tabla 1, se obtuvieron los datos promedio de cada muestreo y mediante la correlación de datos se logró agrupar los valores con los datos de la calidad de los forrajes, los cuales se presentan en la tabla 6.

Tabla 6. Valores promedio de los índices de vegetación relacionados con el análisis bromatológico.

% Mat Seca	% Proteína	GLI	NGRDI	VARI	GRVI	RGB VI	Días
14.6	21.4	0.150	0.115	0.181	-0.115	0.425	25
15.2	24.4	0.158	0.120	0.191	-0.120	0.468	25
16.5	20.3	0.176	0.128	0.198	-0.128	0.506	25
17	22.6	0.161	0.126	0.202	-0.126	0.473	25
14.9	21.9	0.247	0.194	0.285	-0.194	0.629	30
15.9	22.7	0.240	0.186	0.272	-0.186	0.605	30
17.5	22.7	0.133	0.082	0.129	-0.082	0.409	30
17.8	20.5	0.128	0.077	0.120	-0.077	0.397	30

Además de la tabla anterior, se generaron los mapas de los índices de vegetación utilizados en el software Qgis realizando un filtro en los potreros que cuentan con más de 25 días de cosecha, pues los que tienen menos de esos días se encuentran en crecimiento, estos mapas corresponden a las figuras 4, 5, 6, 7 y 8.

Índice RGBVI

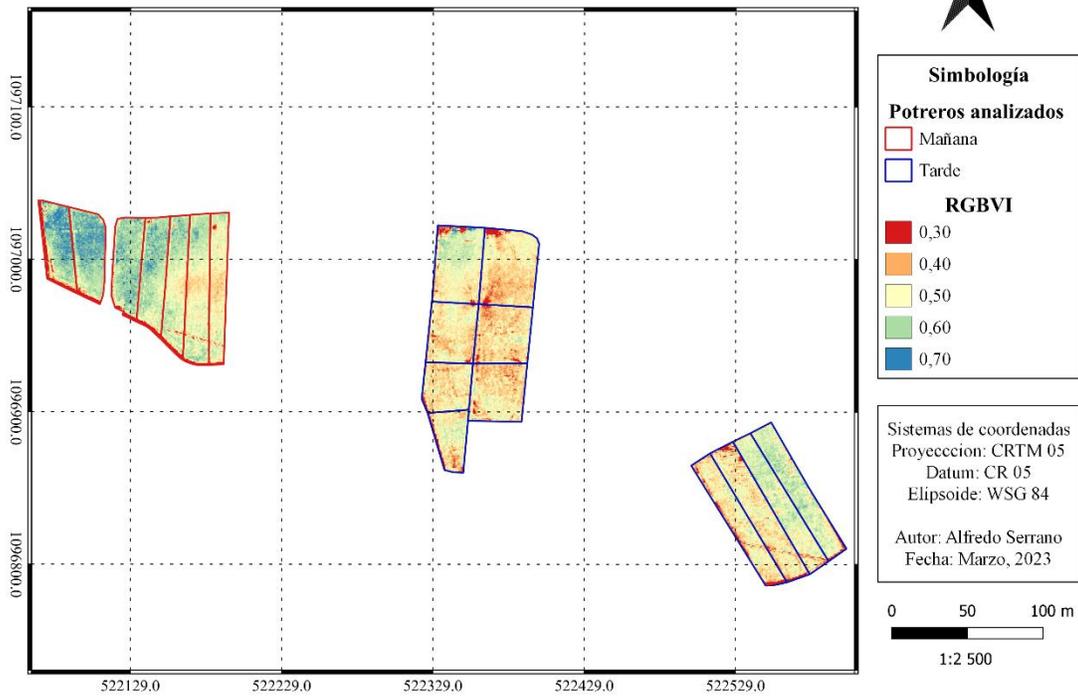


Figura 4. Mapa del índice RGBVI.

Índice GRVI

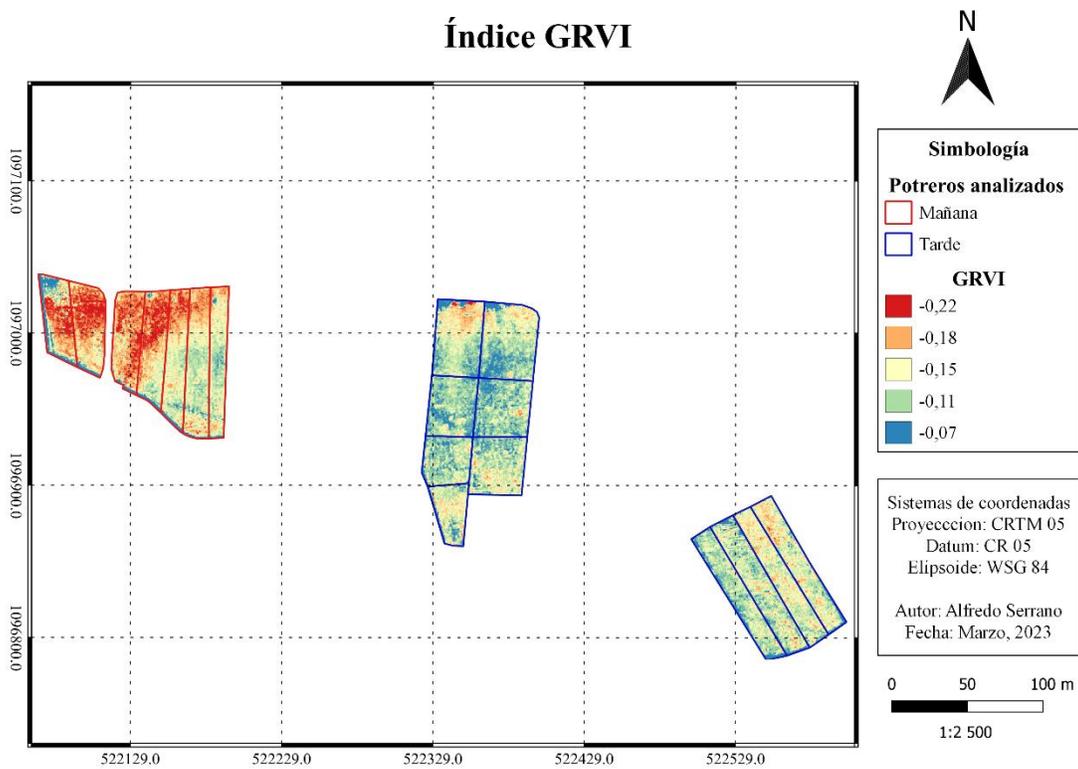


Figura 5. Mapa del índice GRVI.

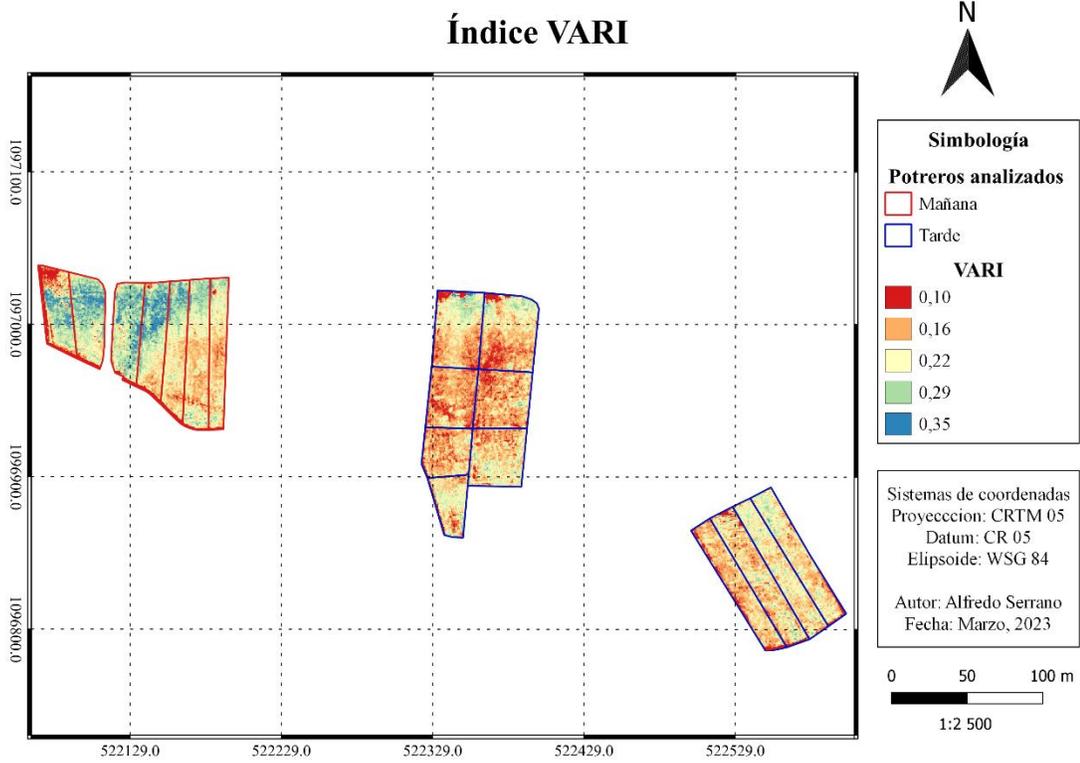


Figura 6. Mapa del índice VARI.

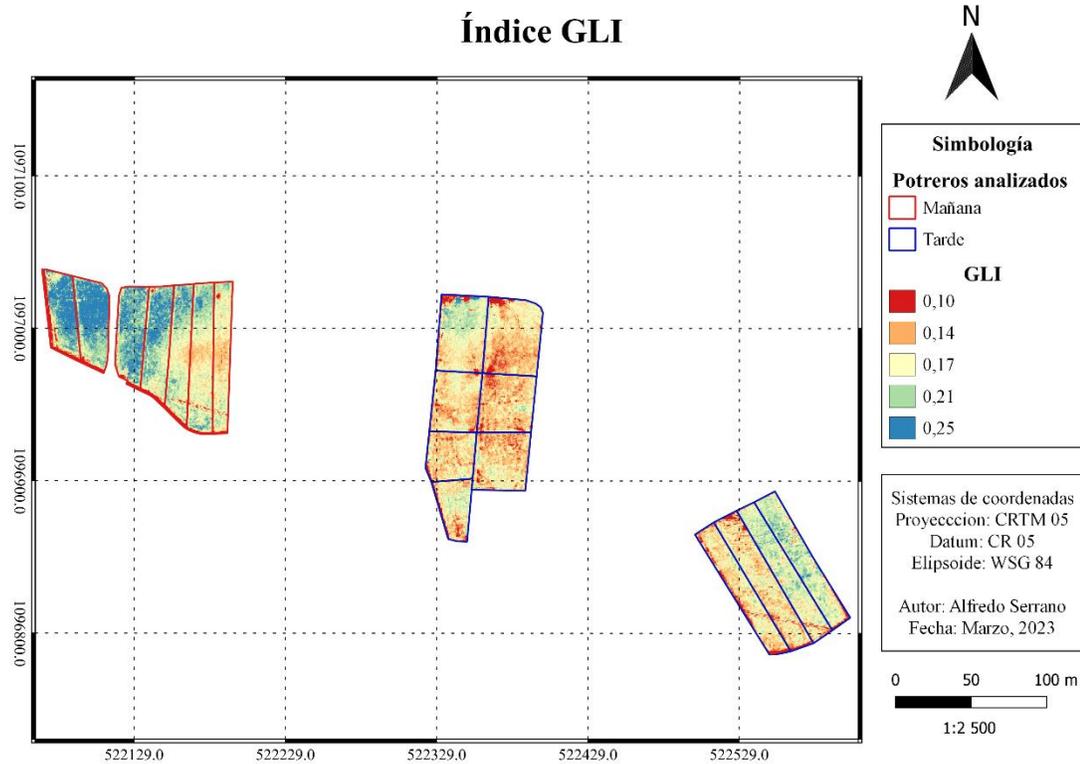


Figura 7. Mapa del índice GLI.

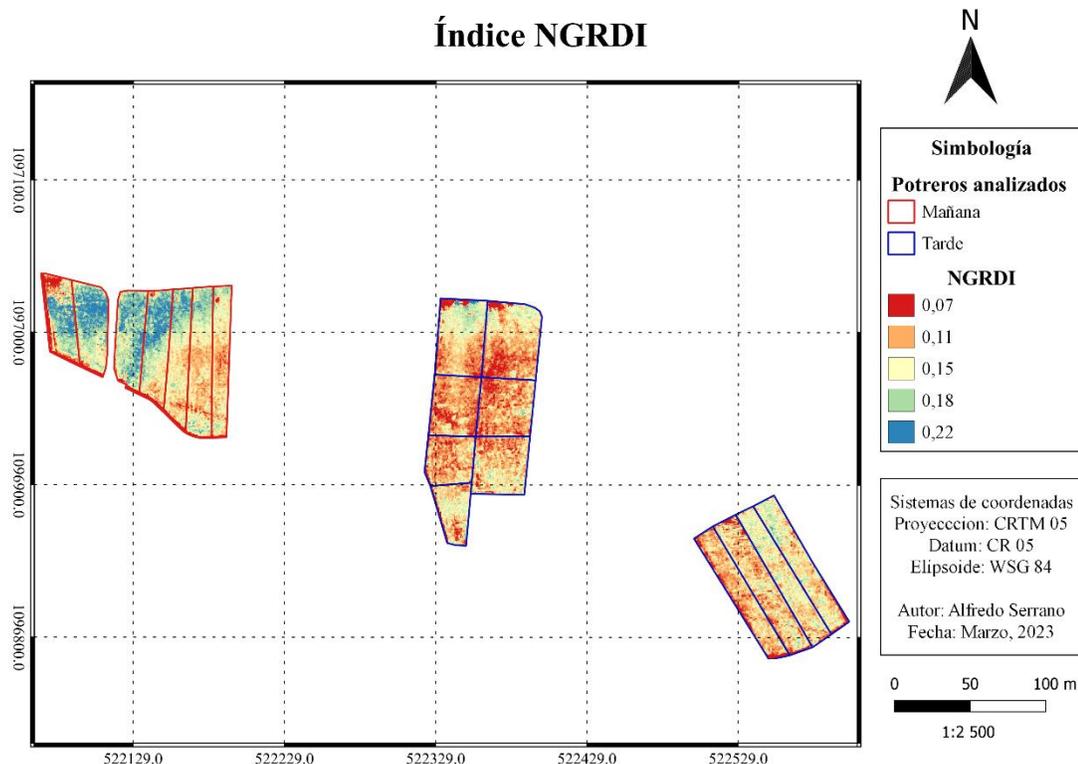


Figura 8. Mapa del índice NGRDI.

5.5 Correlación de datos

Con los datos de la tabla 6 se realizó una correlación múltiple de los índices de vegetación con los datos del análisis bromatológico de interés, con el fin de realizar el ANOVA para obtener los estadísticos de bondad de ajuste y los coeficientes para generar las ecuaciones para las simulaciones.

La tabla 7 se presenta los datos de para proteína donde los valores de F para cada índice son menores al valor de F crítico por lo que se acepta la hipótesis nula (H_0) y se rechaza la hipótesis alternativa (H_1), sin embargo, en la tabla 8 presentan los datos materia seca donde los valores de F son mayores a los de F crítico logrando rechazar la H_0 para cada índice de vegetación utilizado, además las tablas contienen las ecuaciones de variables múltiples para los modelos.

Tabla 7. Datos del ANOVA para la proteína.

PROTEINA			
Índice	F	F crítico	Modelo
RGBVI	0.078	0.926	%Pr = 2.377*RGBVI-0.0648*días+22.684
GRVI	0.105	0.902	%Pr = -5.7407*GRVI-0.0594*días+22.959
VARI	0.128	0.883	%Pr = 4.5988*VARI -0.0527 *días +22.606
GLI	0.071	0.933	%Pr = 4.3158*GLI-0.0674*días+23.1645
NGRDI	0.105	0.902	%Pr = 5.7407*NGRDI-0.0594*días+22.9590
TODOS	0.370	0.848	%Pr = 917.5463*GLI-2384.2758*NGRVI+1333.0586*VARI- 209.5446*RGBVI+0.6947*días-10.7611

Tabla 8. Datos del ANOVA para la materia seca.

MATERIA SECA			
Índice	F	F crítico	Modelo
RGBVI	1.857	0.249	%MS = -8.3181*RGBVI+0.2096*días+14.4787
GRVI	2.791	0.153	%MS = 18.999*GRVI+0.1878*días+13.4534
VARI	2.680	0.162	%MS = -13.4484*VARI+0.1626*días+14.3542
GLI	2.452	0.181	%MS = -17.7215*GLI+0.232*días+12.881
NGRDI	2.791	0.153	%MS = -18.999*NGRDI+0.1878*días+13.4535
TODOS	2.069	0.487	%MS = 1095.5178*GLI-2505.1279*NGRDI+1264.3326*VARI- 204.8196*RGBVI+0.3363*días-10.9954

A partir de los modelos anteriores se graficaron los datos obtenidos en el análisis bromatológico de laboratorio vs los modelados por cada índice y también agrupando todos los índices, a su vez se presenta la tendencia para visualizar las dispersiones de los datos, esta información muestra en las figuras 9 y 10 que corresponden a proteína y materia seca respectivamente.

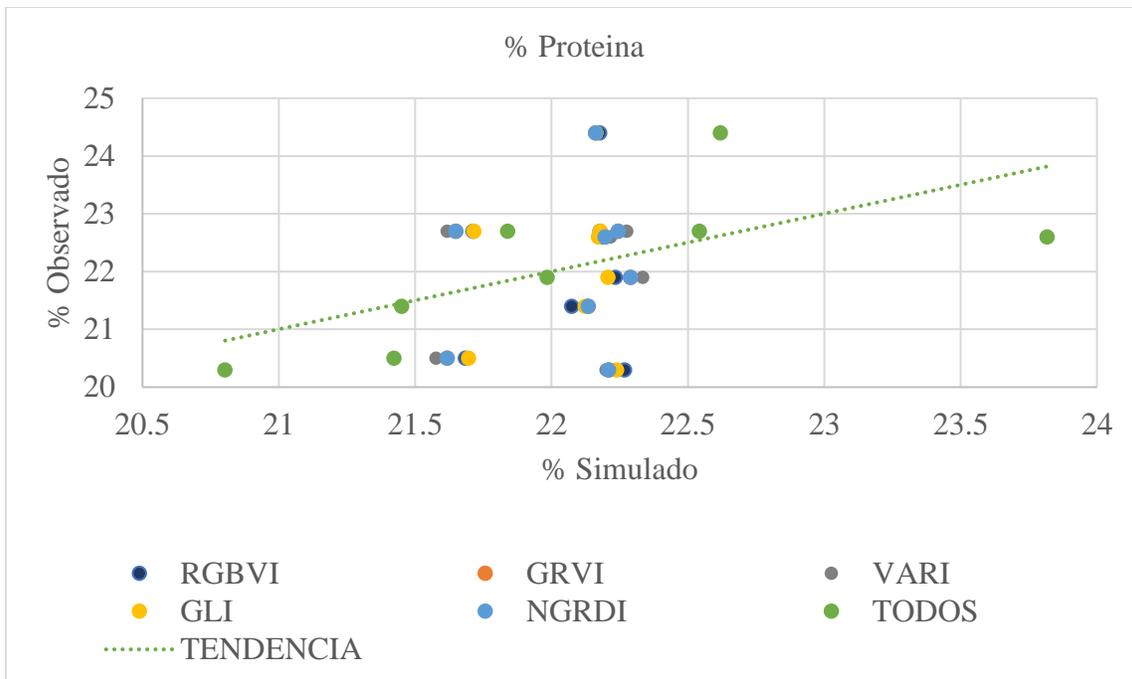


Figura 9. Gráfico de datos simulados para la proteína.

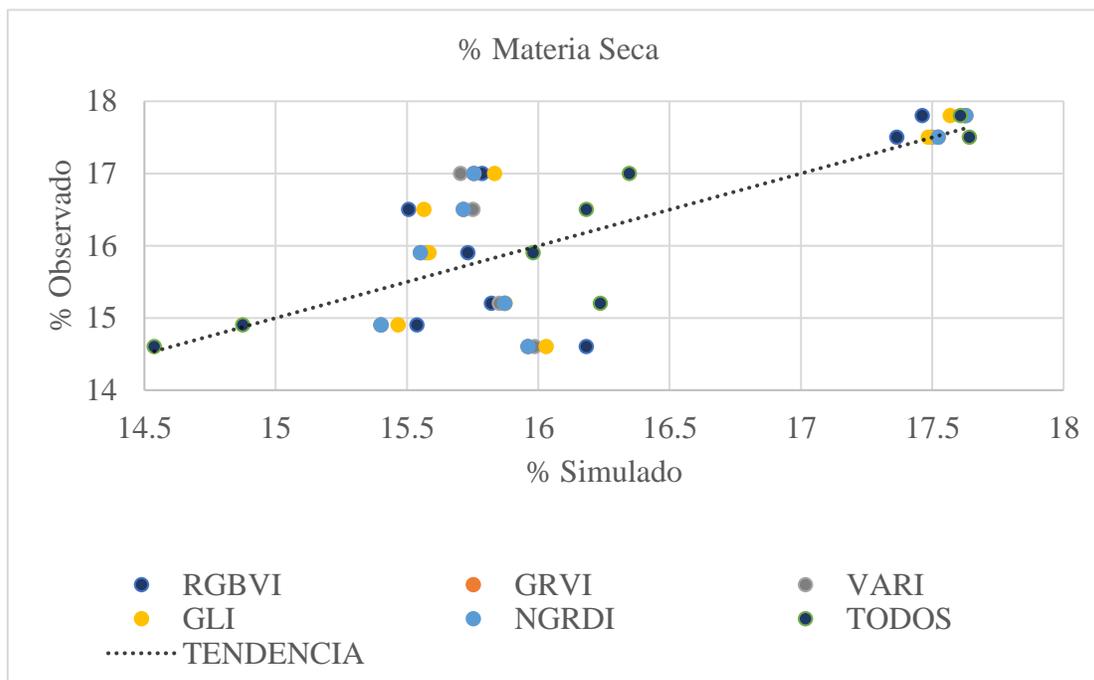


Figura 10. Gráfico de datos simulados para la materia seca.

Una vez con los gráficos realizados se pudo obtener las ecuaciones de los modelos de una sola variable y los coeficientes de R^2 para analizar cuál es la opción que presenta mayor importancia, cuyo caso de la proteína el agrupar todos los índices presenta un R^2 de 0.48 y para materia seca se tiene un R^2 de 0.83 cuando también se usan todos los índices juntos, cabe resaltar que en temas de agricultura las correlaciones no son tan certeras, se considera que un R^2 superior a 0.6 se considera buena correlación. La información específica se muestra en las tablas 9 y 10.

Tabla 9. Modelos y coeficientes de determinación para la proteína.

PROTEÍNA		
Índice	Modelo	R²
RGBVI	$y = 1.0007x - 0.017$	0.0302
GRVI	$y = 1.0001x - 0.0039$	0.0404
VARI	$y = 1.0002x - 0.0053$	0.0486
GLI	$y = 1x + 0.0008$	0.0275
NGRDI	$y = 1.0001x - 0.0039$	0.0404
TODOS	$y = 1x + 0.003$	0.4808

Tabla 10 Modelos y coeficientes de determinación para la materia seca.

MATERIA SECA		
Índice	Modelo	R²
RGBVI	$y = 1x + 5E-05$	0.4262
GRVI	$y = 1x - 0.0002$	0.5275
VARI	$y = 1.0001x + 0.0004$	0.5174
GLI	$y = 1x - 0.0001$	0.4951
NGRDI	$y = 1x - 0.0003$	0.5275
TODOS	$y = 1x - 0.0005$	0.838

5.6 Generación de mapas

Realizados las ecuaciones de los modelos de las tablas 5 y 6, se generaron los mapas en el software QGIS en la calculadora ráster, que permite obtener los valores de los nutrientes de manera de escala diferenciada por colores según sea el porcentaje del nutriente. Para este resultado se aplicó con un filtro de tomar en cuenta solamente en los potreros mayores a 25 días de pastoreo debido a que antes de esta edad los potreros se encuentran en pleno crecimiento y aumentaría la dificultad al momento de crear los mapas.

Al utilizar solamente los potreros que cuentan con más de 25 de pastoreo, para el turno de la mañana se utilizan solamente 7 y para el turno de la tarde con 11, logrando proyectar una semana como mínimo los valores nutricionales de los pastos.

En las siguientes figuras se presentan los mapas generados sobre la proteína con los distintos índices de vegetación.

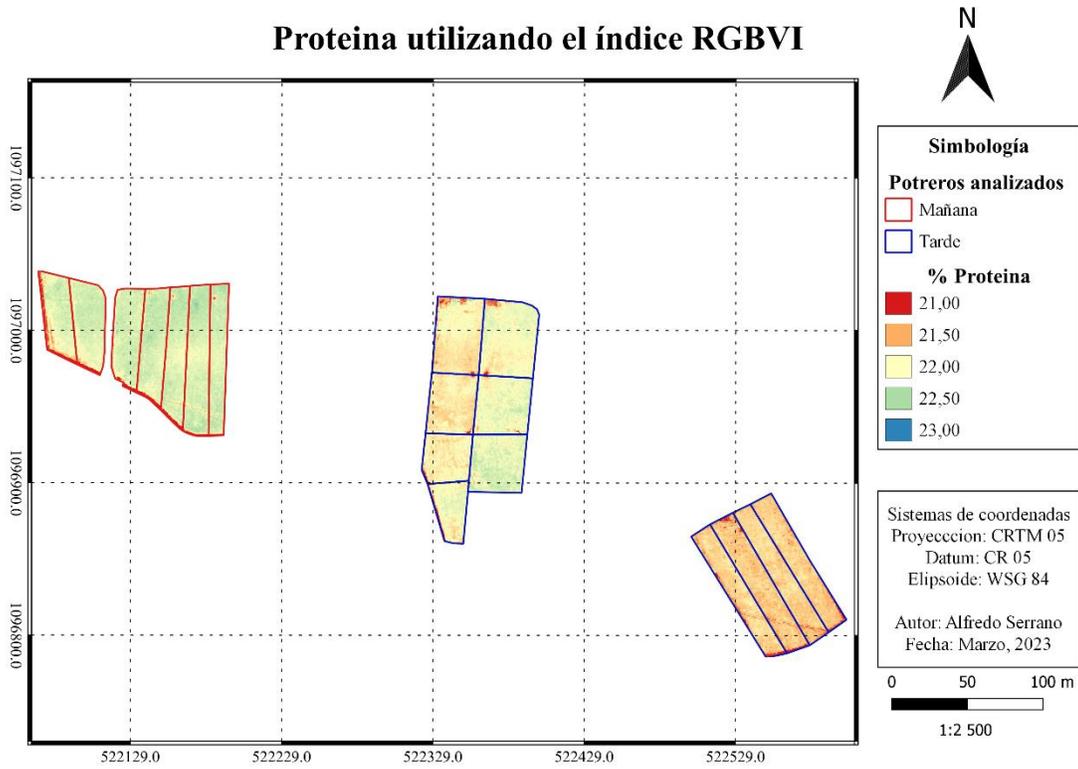


Figura 11. Mapa de proteína con el índice RGBVI.

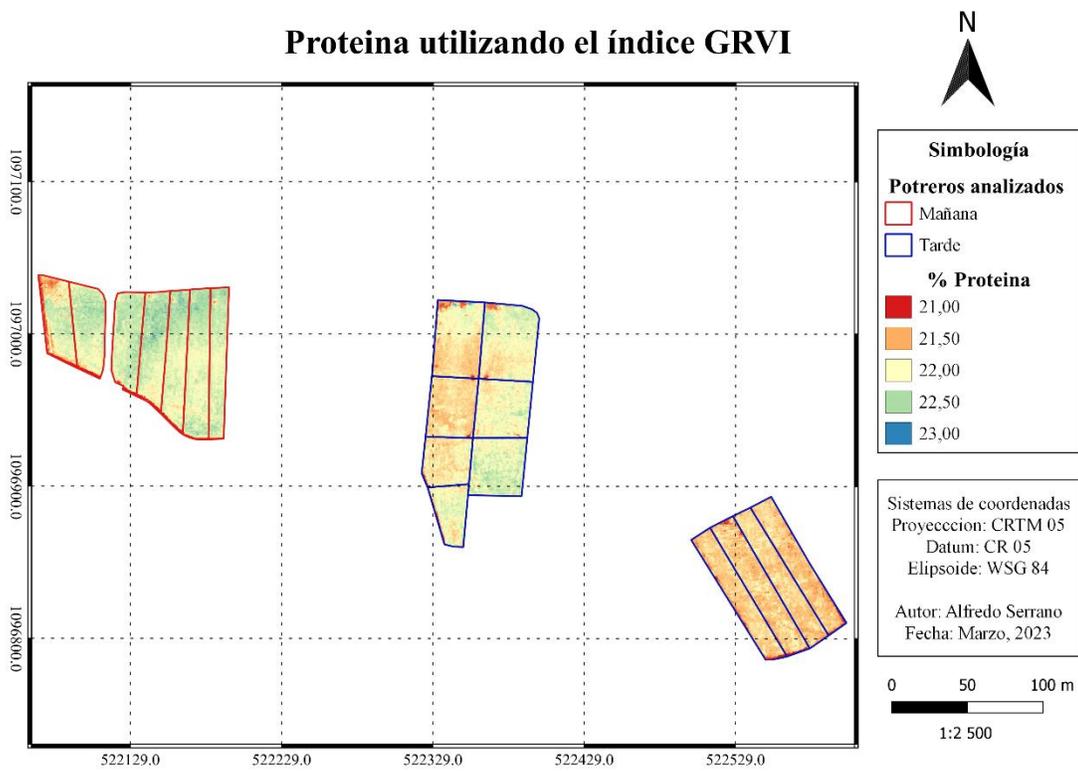


Figura 12. Mapa de proteína con el índice GRVI.

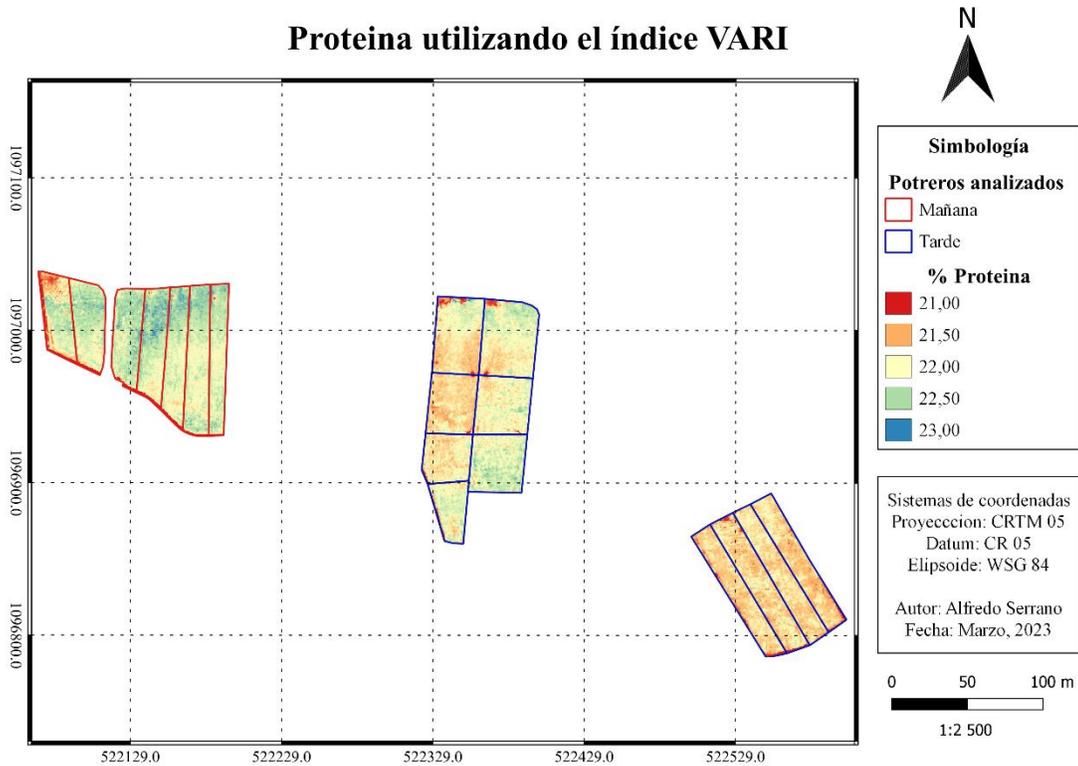


Figura 13. Mapa de proteína con el índice VARI.

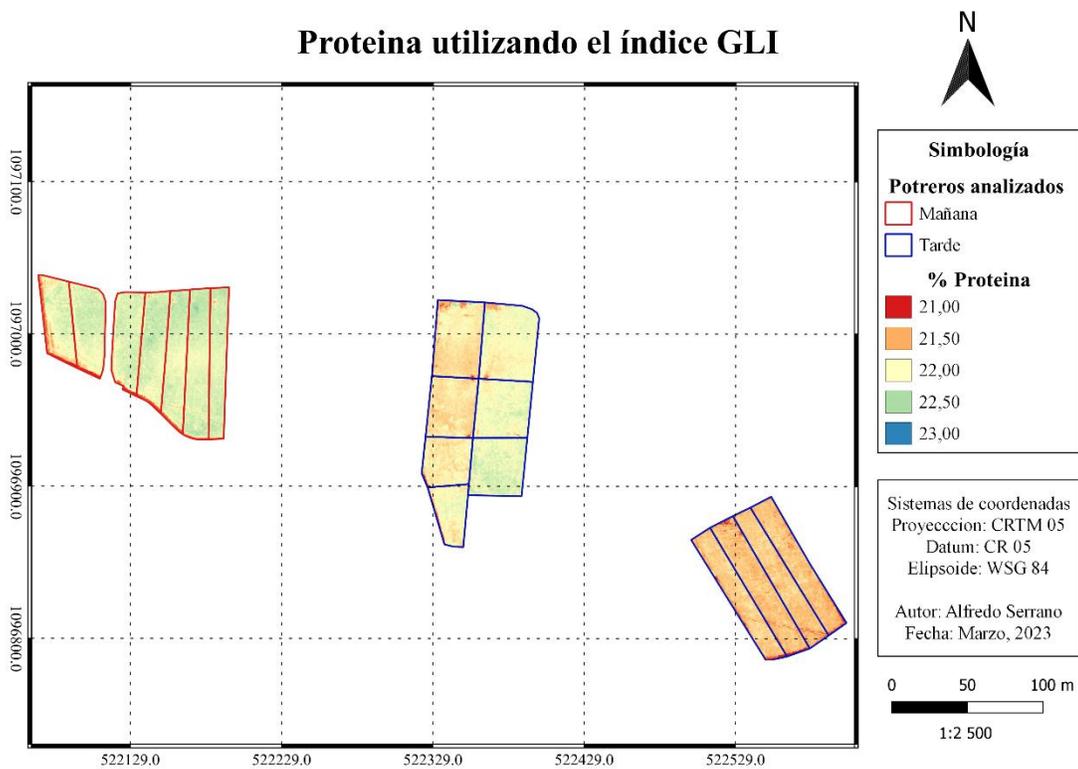


Figura 14. Mapa de proteína con el índice GLI.

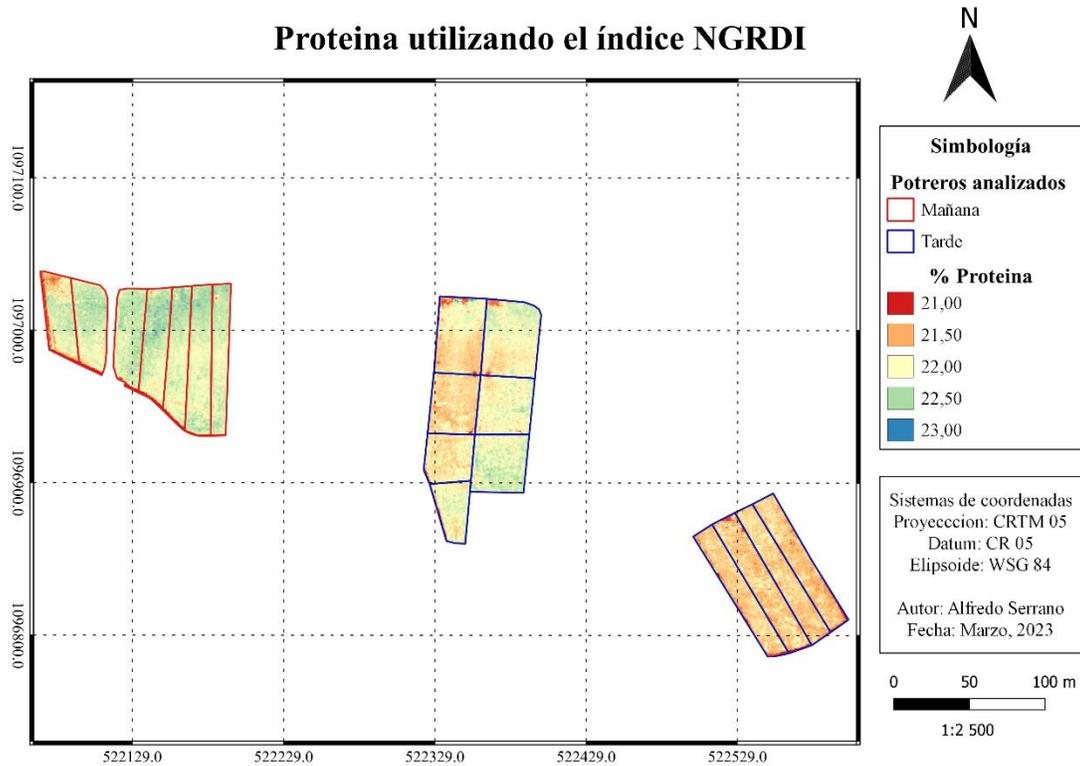


Figura 15. Mapa de proteína con el índice NGRDI.

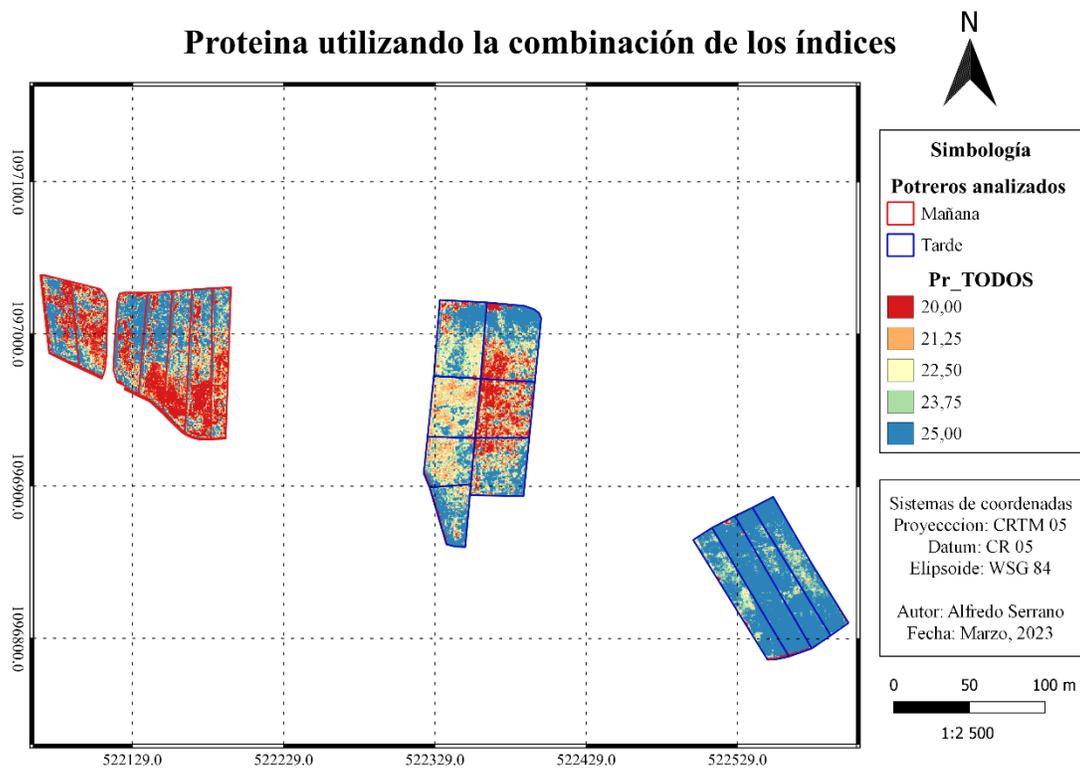


Figura 16. Mapa de proteína con la combinación de los índices.

De acuerdo con las figuras 11, 12, 13, 14 y 15 que muestran los valores de proteína en los potreros, se observa que para los índices RGBVI, GRVI, VARI, GLI y NGRDI los valores de proteína se encuentran entre el 21-23%, donde se presentan el valor de 21% es en los potreros que se encuentran en el turno de la tarde y lo que superan los 30 días de pastoreo, y por el contrario, los que cuentan con un 23% de proteína son los que se utilizan en los potreros del turno de la mañana y los que son menores a los 30 días de pastoreo.

Sin embargo, en el mapa donde se utilizan todos los índices, figura 16, se encuentra una diferencia con respecto a los demás, donde el porcentaje de proteína se encuentran entre el 20-25%, donde los potreros de la tarde con mayor a los 30 días valores de 25% de proteína y presentado mayor variabilidad en todos los demás.

A continuación, corresponden a las imágenes que representan el porcentaje de materia seca en los forrajes.

Materia seca utilizando el índice RGBVI

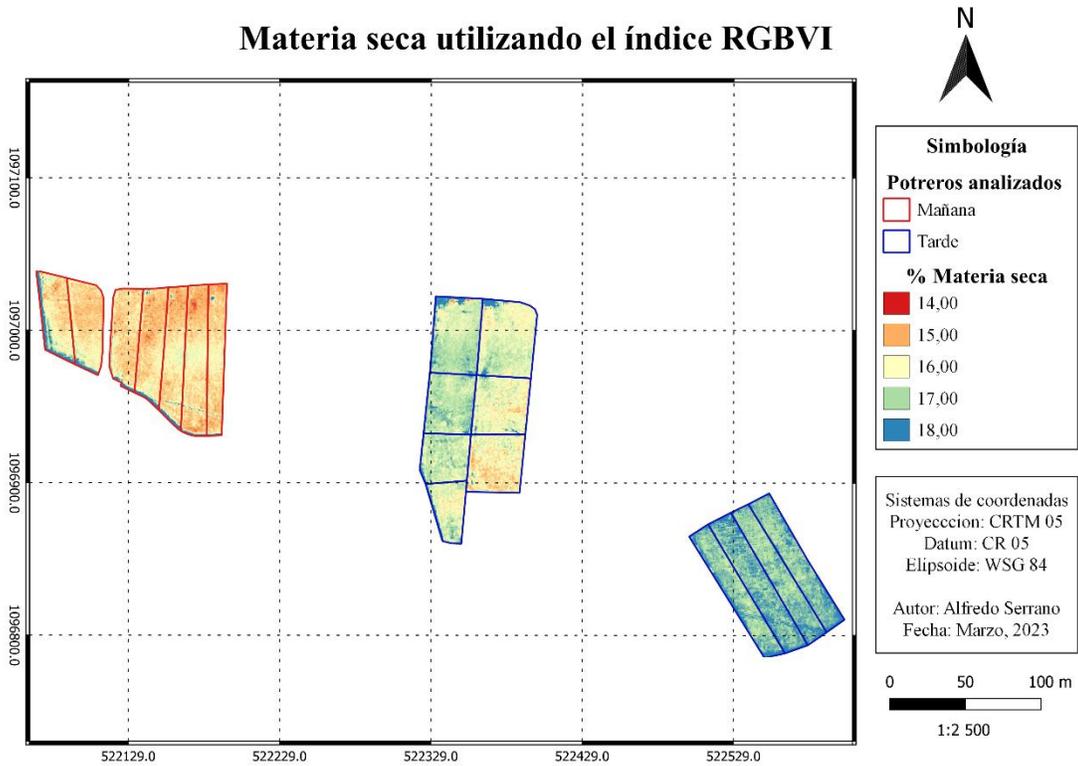


Figura 17. Mapa de materia seca con el índice RGBVI.

Materia seca utilizando el índice GRVI

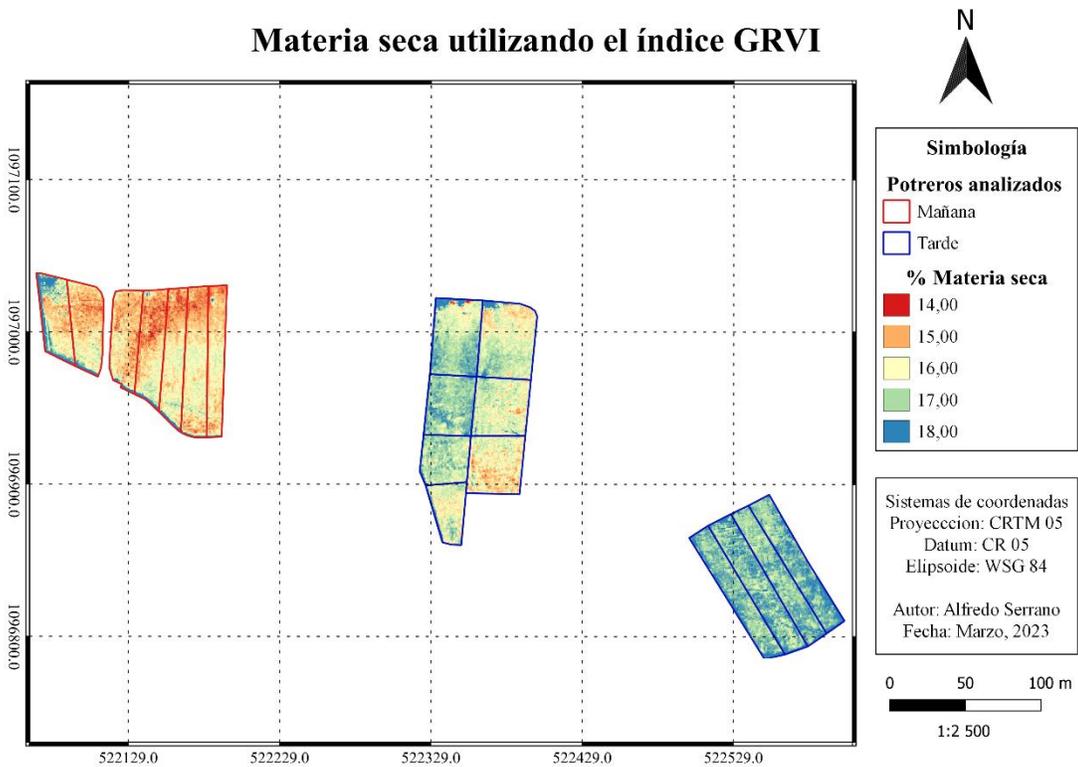


Figura 18. Mapa de materia seca con el índice GRVI.

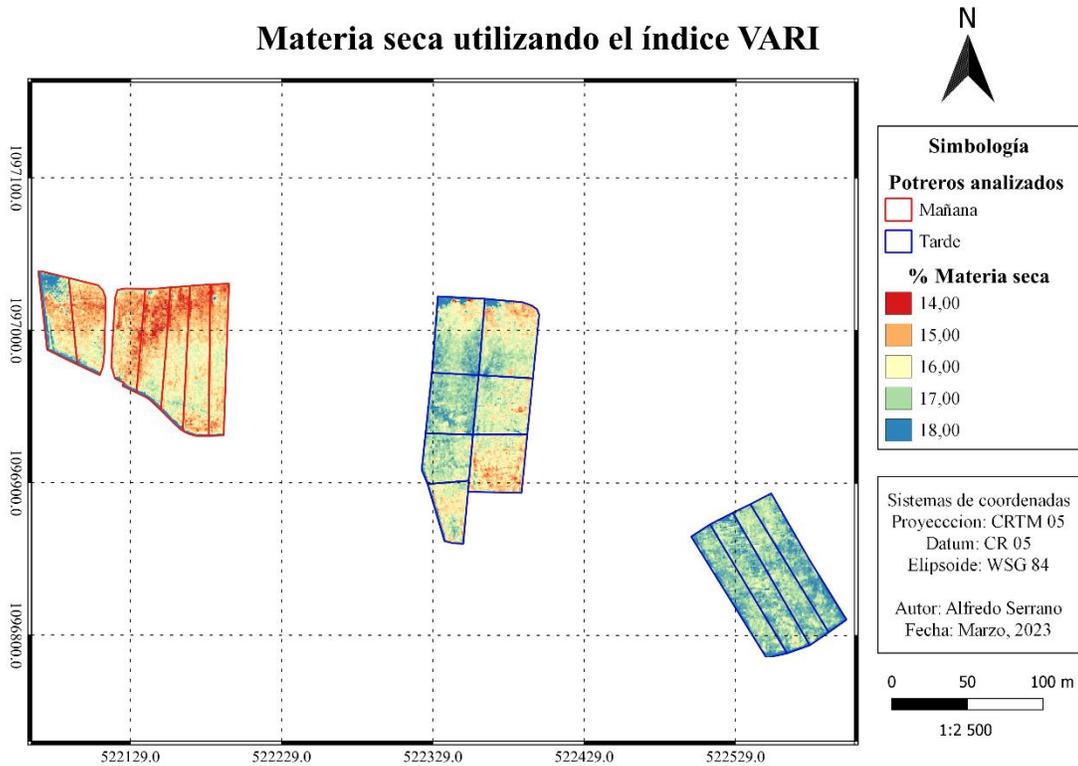


Figura 19. Mapa de materia seca con el índice VARI.

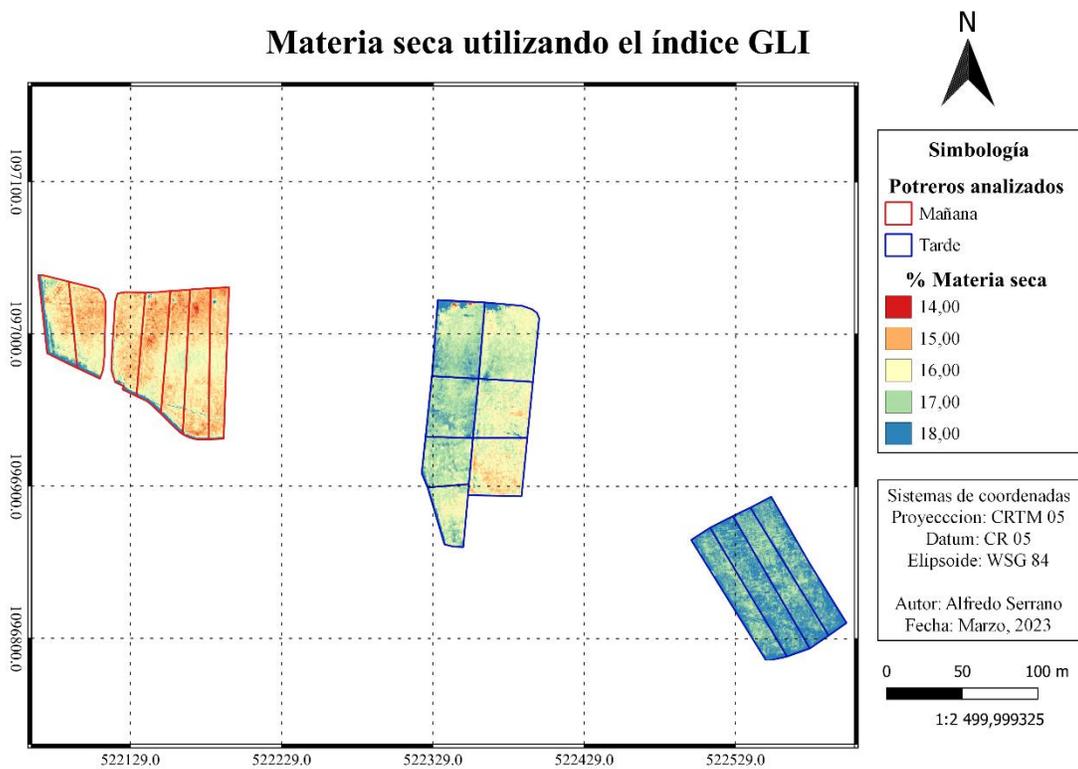


Figura 20. Mapa de materia seca con el índice GLI.

Materia seca utilizando el índice NGRDI

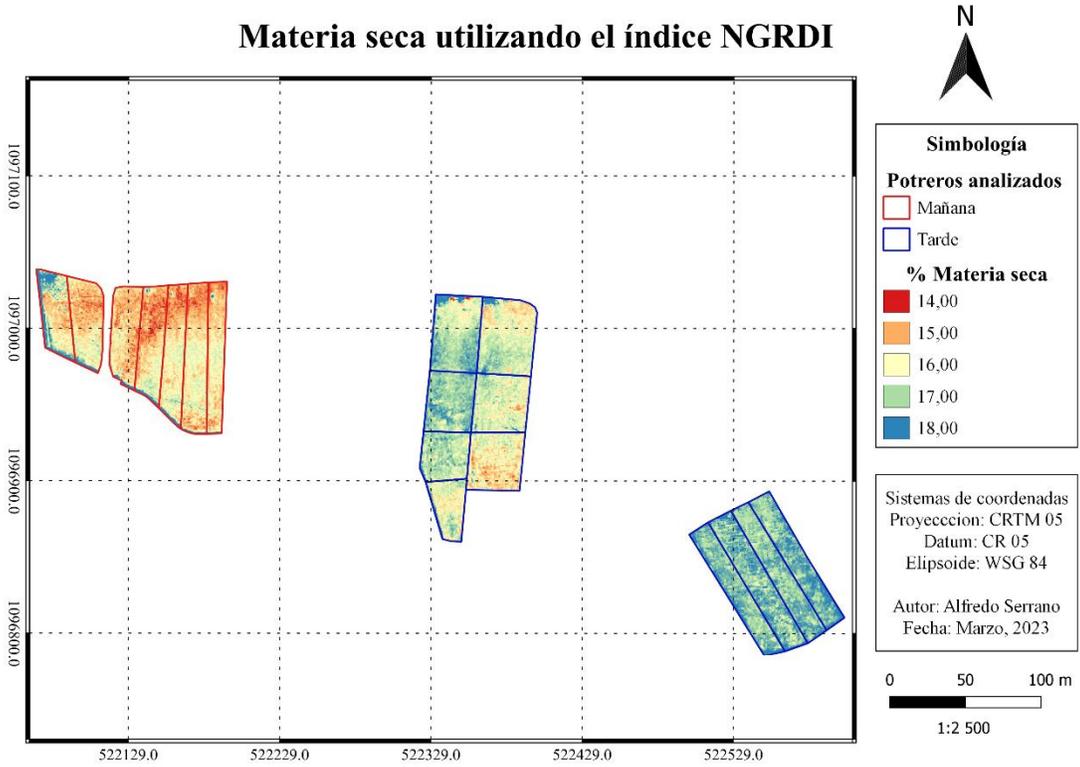


Figura 21. Mapa de materia seca con el índice NGRDI.

Materia seca utilizando la combinación de los índices

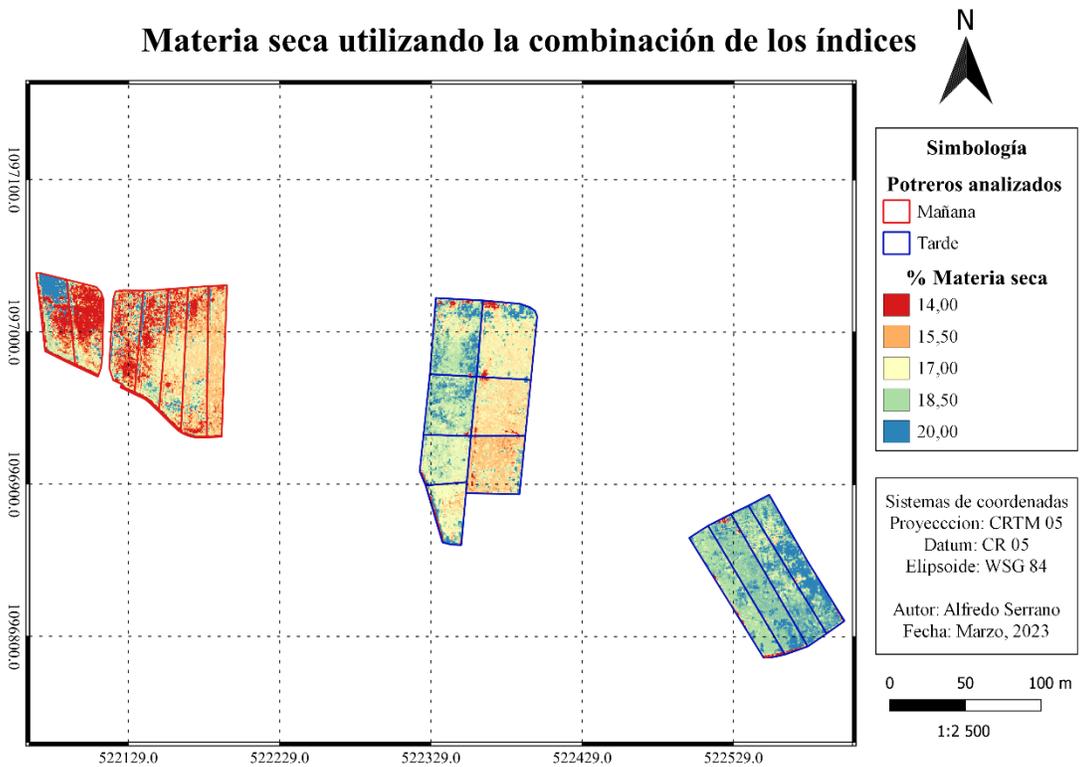


Figura 22. Mapa de materia seca con la combinación de los índices.

Con base en las figuras 17, 18, 19, 20 y 21 indican los valores de materia seca presente en los potreros que tienen más de 25 días de pastoreo, donde tienen un valor mínimo de 14% y un valor máximo de 18%, los valores de materia seca se presentan mayores en los potreros del turno de la tarde mayores a 30 días de pastoreo y lo que presentan menores valores son los del turno de la mañana. Pero, en la figura 22, la que muestra el uso de todos los índices, la escala de materia seca va del 14-20% presentándose el mismo comportamiento donde el mayor porcentaje de materia seca se encuentra en los potreros de mayor edad de pastoreo en el turno de la tarde.

5.7 Modelo de gestión de pastoreo

Para realizar el modelo de gestión del pastoreo se toma en cuenta el porcentaje de materia seca, el mismo se estableció con un valor mínimo de 15 %, si este es superior se considera aceptable para cosechar, pero, si es inferior aún no se encuentra listo para cosechar, sin embargo, también se puede considerar un potrero para cosecha si este contiene pequeñas zonas que están incompletas en el porcentaje de materia seca, dejándolas a discreción del productor si los utiliza, en la figura 23 representa el mapa de los potreros según el porcentaje de materia seca.

Mapa de gestión de pastoreo por el porcentaje de materia seca

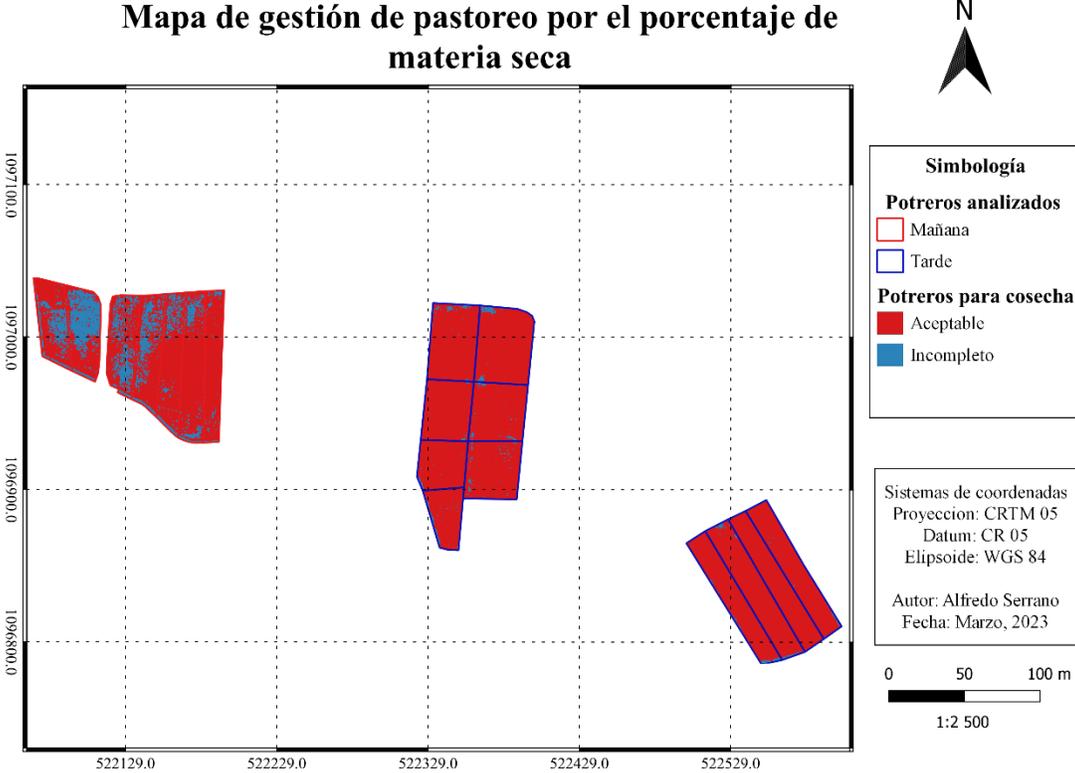


Figura 23. Mapa de gestión de pastoreo.

5.8 Valoración económica

El costo detallado para el monitoreo semanal se presenta en la tabla 11, la cual toma de referencia la tabla 2 sobre la rúbrica del monitoreo semanal, que incluye el precio del dron y software en dólares, cuyo tipo de cambio se tomó como base ₡560.00, y el costo de mano de obra técnica en colones.

Tabla 11. Costos de monitoreo semanal.

Descripción	Costo	Costo semanal
Drone	\$ 666.67	₡ 7 179.49
Software	\$ 1 000.00	₡ 10 769.23
Vuelo	₡ 15 000.0	₡ 15 000.0
Procesamiento	₡ 15 000.0	₡ 15 000.0
	Total	₡ 47 948.72

Con base en la tabla anterior, el costo semanal del monitoreo es de ₡ 47 950.0, y teniendo en cuenta que el área productiva de estudio es de 8.6 Ha, el costo por Ha es de ₡ 5 580.

6. CONCLUSIONES

El muestreo del suelo reflejo el estado de la finca con respecto a las características físicas como humedad volumétrica con niveles mínimos de 50% permitiendo una buena retención y movilidad de agua y aire, también la resistencia a la penetración cuales valores promedio fueron de 1.0 Mpa que permiten al cultivo buena penetración y adherencia de las raíces, y el pH que se encontraba en niveles de neutralidad lo cual favorece la absorción de los nutrientes para el aprovechamiento del cultivo. Por lo que, se considera que las características de suelo no inciden en la producción del forraje.

La correlación espacial permitió la agrupación de los valores nutricionales de la calidad con los valores de los índices de vegetación, obteniendo distintos modelos de monitoreo, los mismos se evaluaron según su coeficiente de correlación R^2 , los cuales para el caso de la proteína el que presento menor grado de asocio con el índice de GLI con un R^2 de 0.0275 y en su contraparte los mayores fue con la combinación multivariable de los índices RGBVI, GRVI, VARI, GLI y NGRDI con un R^2 de 0.4808, para la materia seca el índice con menor coeficiente fue el RGBVI con un R^2 de 0.4262 y con el mayor coeficiente fue la combinación de todos los índices con un R^2 de 0.838.

El modelo de gestión de pastoreo que se propone se compone tanto del porcentaje de materia seca como de proteína por lo que debe de tener una relación de ambos, debido a esto, el punto óptimo de pastoreo se encuentra mayor a 30 días después de la cosecha, ya que se obtiene un alto nivel de los componentes nutricionales analizados según los modelos elegidos que indican que porcentaje de proteína se encuentran entre el rango de 20-25% y para el porcentaje de materia seca esta entre el 14-20%.

La viabilidad del proyecto se analizó a partir de una valoración económica con la cual logro estimar un costo por hectárea inferior a los ₡ 6 000, considerando esto como una inversión pequeña si se contemplan los beneficios potenciales que le aporta a la finca.

7. RECOMENDACIONES

Tomando en cuenta las conclusiones anteriores:

Si se realizan mayor cantidad muestreos de los pastos para los análisis bromatológicos se pueden obtener modelos más precisos.

Cuando se extraigan las muestras de forrajes, que estas sean de las zonas más representativas de los potreros, como en las zonas centrales de los mismos pues es ahí donde se establece el manejo y concentración de los animales.

Con el fin de la mejora continua, realizar una comparación de los datos derivados de los modelos con análisis de laboratorio cada periodo de tiempo para inspeccionar que los nutrientes tengan una concordancia en sus valores.

En el caso de mejorar los valores de correlación para la proteína, la gestión de pastoreo se debe de realizar en base a este valor, pues es de significancia al momento de la producción lechera.

8. BIBLIOGRAFIA

- Atencio, L. M., Tapia, J. J., Mejía, S. L., & Cadena, J. (2014). Comportamiento fisiológico de gramíneas bajo tres niveles de humedad. *Temas Agrarios*, 19(2), 244–258.
<https://doi.org/https://doi.org/10.21897/rta.v19i2.1194>
- Bacigaluppo, S., & Gerster, G. (2017). *Las gramíneas contribuyen a la descompactación de los suelos*. www.intainforma.inta.gov.ar
- Banco mundial. (2021). *El marcado aumento de los precios de la energía conlleva riesgos de inflación mientras persisten las limitaciones de la oferta*.
[https://www.bancomundial.org/es/news/press-release/2021/10/21/soaring-energy-prices-
pose-inflation-risks-as-supply-constraints-persist](https://www.bancomundial.org/es/news/press-release/2021/10/21/soaring-energy-prices-pose-inflation-risks-as-supply-constraints-persist)
- Barbosa, B. D. S., Ferraz, G. A. S., Gonçalves, L. M., Marin, D. B., Maciel, D. T., Ferraz, P. F. P., & Rossi, G. (2019). RGB vegetation indices applied to grass monitoring: A qualitative analysis. *Agronomy Research*, 17(2), 349–357. <https://doi.org/10.15159/AR.19.119>
- Bendig, J., Yu, K., Aasen, H., Bolten, A., Bennertz, S., Broscheit, J., Gnyp, M. L., & Bareth, G. (2015). Combining UAV-based plant height from crop surface models, visible, and near infrared vegetation indices for biomass monitoring in barley. *International Journal of Applied Earth Observation and Geoinformation*, 39, 79–87.
<https://doi.org/10.1016/j.jag.2015.02.012>
- Cadenas Anaya, C., & Guaita, W. (2021). Análisis de regresión múltiple. *Catálogo Editorial*, 96–101. <https://doi.org/10.15765/poli.v1i695.2371>
- Catalán Salas, G. (2016). El pH del suelo en la agricultura. *Nutrición y Salud Vegetal, Agropal S.*

L. <http://www.agropal.com/es/el-ph-del-suelo>

Contexto Ganadero. (2019). *Con drones analizan la calidad nutricional de praderas.*

<https://www.contextoganadero.com/ganaderia-sostenible/con-drones-analizan-la-calidad-nutricional-de-praderas>

Echeverri, A. (2022). *Pastoreo de precisión, una forma de mantener rentable el negocio*

ganadero. CONtexto Ganadero. <https://www.contextoganadero.com/ganaderia-sostenible/pastoreo-de-precision-una-forma-de-mantener-rentable-el-negocio-ganadero>

Fallas, J. (2010). *Geoprocesamiento.*

FAO. (2021). *Siete razones por las que el pastoreo favorece un futuro mejor.*

<https://www.fao.org/fao-stories/article/es/c/1455057/>

FAO. (2022). *El papel de la FAO en la ganadería y el medio ambiente.*

<https://www.fao.org/livestock-environment/es/>

García-Martínez, H., Flores-Magdaleno, H., Ascencio-Hernández, R., Khalil-Gardezi, A.,

Tijerina-Chávez, L., Mancilla-Villa, O. R., & Vázquez-Peña, M. A. (2020). Corn grain yield estimation from vegetation indices, canopy cover, plant density, and a neural network using multispectral and rgb images acquired with unmanned aerial vehicles. *Agriculture (Switzerland)*, 10(7), 1–24. <https://doi.org/10.3390/agriculture10070277>

Guzman-Alvarez, J. A., González-Zuñiga, M., Sandoval Fernandez, J. A., & Calvo-Alvarado, J.

C. (2022). Uso de sensores remotos en la agricultura: aplicaciones en el cultivo del banano. *Agronomía Mesoamericana*, 33(3), 48279. <https://doi.org/10.15517/am.v33i3.48279>

IGN. (2018). 3D Analyst y ArcGlobe. Teledetección. *Instituto Geográfico Nacional*, 2.

<https://www.ign.es/web/resources/docs/IGNCnig/OBS-Teledeteccion.pdf>

IICA. (2016). *LA AGRICULTURA DE PRECISIÓN TIENE POTENCIAL PARA*

TRANSFORMAR EL AGRO. <https://www.iica.int/es/prensa/noticias/la-agricultura-de-precisi%25C3%25B3n-tiene-potencial-para-transformar-el-agro>

INEC. (2020). Encuesta Nacional Agropecuaria 2019. *Boletín Técnico, 1*, 1–38.

<https://www.inegi.org.mx/programas/ena/2019/>

Instituto Nacional de Investigaciones Forestales, A. y P. (2022). *Sensores remotos y vehículos aéreos no tripulados y sus aplicaciones en la agricultura*.

<https://www.gob.mx/inifap/articulos/sensores-remotos-y-vehiculos-aereos-no-tripulados-y-sus-aplicaciones-en-la-agricultura?idiom=es#:~:text=El uso de sensores remotos,decisiones en forma más oportuna.>

Luisoni, L. H. (2010). Pastoreo rotativo en pastizales. *Inta*.

Luque Ordóñez, J. (2012). Espectro electromagnético y espectro radioeléctrico. *Acta, Núm. 62*, 19–23. <https://www.acta.es/recursos/revista-digital-manuales-formativos/13-062>

Lussem, U., Bolten, A., Gnyp, M. L., Jasper, J., & Bareth, G. (2018). Evaluation of RGB-based vegetation indices from UAV imagery to estimate forage yield in Grassland. *International Archives of the Photogrammetry, Remote Sensing and Spatial Information Sciences - ISPRS Archives, 42(3)*, 1215–1219. <https://doi.org/10.5194/isprs-archives-XLII-3-1215-2018>

Marín, J., Yousfi, S., Mauri, P. V., Parra, L., Lloret, J., & Masaguer, A. (2020). RGB vegetation indices, NDVI, and biomass as indicators to evaluate C3 and C4 turfgrass under different water conditions. *Sustainability (Switzerland), 12(6)*.

<https://doi.org/10.3390/su12062160>

Medina, C. (2016). Efectos de la compactación de suelos por el pisoteo de animales, en la productividad de los suelos. *Remediaciones. Revista Colombiana de Ciencia Animal*, 8(1), 88–93. <https://revistas.unisucre.edu.co/index.php/recia/article/download/229/270/>

Muñoz, P. (2013). *Índices de vegetación*.

Navarro, J., Pacheco, J., Cabrera, A., Luna, V., Alva, A., Bernal, A., Arteaga, M., Corona, R., & Manaham, S. (2011). Técnicas de muestreo para manejadores de recursos naturales. Segunda edición. In *Universidad Autónoma de México, Centro de Investigaciones en Geografía Ambiental*.
<http://books.google.com/books?hl=en&lr=&id=iChhyOsktnMC&oi=fnd&pg=PA13&dq=Técnicas+de+muestreo+para+manejadores+de+recursos+naturales&ots=h7EaY04nlp&sig=p6hp1ZrIFfSvx0doyloOFzDnI8g%0Ahttp://www.sidalc.net/cgi-bin/wxis.exe/?IsisScript=AGRIUAN.xis&method=po>

O'neal Coto, K. (2019). *El uso eficiente de pastos aumentará la competitividad del sector lechero*. <https://www.ucr.ac.cr/noticias/2019/11/07/el-uso-eficiente-de-pastos-aumentara-la-competitividad-del-sector-lechero.html>

Olaya, V. (2020). *Sistemas de información geográfica* (Vol. 21, Issue 1). <http://journal.um-surabaya.ac.id/index.php/JKM/article/view/2203>

ONU. (2021). La población mundial sigue en aumento. aunque sea cada vez más vieja. *El Coronavirus Ha Costado Ya 50.000 Millones de Dólares a La Economía Mundial*, 1–7. <https://news.un.org/es/story/2019/06/1457891>

- Opio, C., Rodr, P. S., Unidas, N., & Panam, A. (2022). Innovaciones en el sector ganadero. In *Innovaciones en el sector ganadero*. <https://doi.org/10.4060/cc0876es>
- Orno-badia, C. (2018). *Tendencias en Sanidad Vegetal Aplicaciones de la Agricultura de Precisión a la gestión de malas hierbas . Técnicas de aplicación Tendencias en Sanidad Vegetal*. 36–39.
- Pérez-Salas Segrera, J. ., Fenollosa Ribera, M. ., & Guaita-Pradas, I. (2016). *LA VALORACIÓN ECONOMICA EN GANADERÍA*. 9, 41–47.
- Pezo, D., & Garcia, F. (2018). Uso eficiente de fertilizantes en pasturas. *Centro Agronomico de Investigacion y Enseñanza (CATIE)*, 98, 56.
<https://repositorio.catie.ac.cr/handle/11554/9227>
- QGIS. (2022). *Documentacion QGIS*. <https://docs.qgis.org>
- Restrepo Hernandez, L. F. (2021). *Mejoramiento y establecimiento de pasto estrella (Cynodon Plectostachyus) en granja la clarita Caldas Antioquia*. 9–25.
- Sánchez-Ledezma, W., & Mesén-Villalobos, M. (2018). ESTABLECIMIENTO Y MANEJO DEL PASTO KIKUYO(Kikuyuocloa clandestina). *Alcances Tecnológicos*, 8(1), 71–80.
- Solano Mayorca, M. A. (1993). *Los sistemas de informacion geografica: conceptos y utilizacion*.
- UNCPBA. (2012). Resoluciones en teledetección. *Curso Sensores Remotos*, 1, 5.
- Universidad de Antioquia. (2021). Una descripción de la agricultura de precisión -Agricultura 4.0. *Cedait*, 26, 2021.
- Valdés Conroy, H. (2017). *Agricultura de precisión: una posible respuesta al cambio climático y a la seguridad alimentaria*. <https://blogs.iadb.org/sostenibilidad/es/agricultura-de-precision->

una-posible-respuesta-al-cambio-climatico-y-a-la-seguridad-alimentaria-pero-es-asequible-
para-todos-2/

Villalobos, L., & Arce, J. (2014). Evaluación agronómica y nutricional del pasto estrella africana (Cynodon nlemfuensis) En la zona de Monteverde, Puntarenas, Costa Rica. II. Valor nutricional./Agronomic and nutritional evaluation of african star grass-based pastures (Cynodon nlemfuensi. *Agronomía Costarricense*, 38(1), 133–145.
http://www.scielo.sa.cr/scielo.php?script=sci_arttext&pid=S0377-94242014000100008&lng=en&nrm=iso&tlng=es

Villalobos, L., & WingChing-Jones, R. (2019). *Los pastos estrella africana, kikuyo y “rye grass” en Cartago, Costa Rica: biomasa, composición botánica y nutrientes.*
<https://www.redalyc.org/journal/5156/515663758007/html/>

Villón Bejar, M. (2006). *Hidología estadística.*

9. ANEXOS



LABORATORIO DE ASEG DE CALIDAD

Página 1 de 3

SOLICITANTE : Ovely Quirós R.
ASESOR TECNICO INTEGRAL

MUESTRA FORRAJES Y SUBPRODUCTOS
FECHA REPORTE 22/09/2022
ASOCIADO GALLEGOS JIMENEZ ALFREDO
PROCEDENCIA Provincia CARTAGO Cantón ALVARADO Distrito PACAYAS

INFORME DE RESULTADOS

No. Silacc	Fecha Muestra	Identificación	Lote	Días Corta	Ensayo	Resultado	Observaciones	
356803	09/09/2022	MEZCLA DE FORRAJES	Piso	#2	25	% Mat. Seca	17.0	kikuyo + estrella pt10 bajo
						%Cenizas	12.0	
						%Ext. Etér.	1.5	
						%FAD	36.7	
						%FND	67.0	
						%Lignina	6.2	
						%Proteína	22.6	
356805	09/09/2022	MEZCLA DE FORRAJES	Piso	#2	30	% Mat. Seca	17.8	kikuyo + estrella 5 abajo
						%Cenizas	12.3	
						%Ext. Etér.	1.5	
						%FAD	35.4	
						%FND	66.9	
						%Lignina	5.5	
						%Proteína	20.5	
356807	09/09/2022	KIKUYO	Piso	#1	ni	% Mat. Seca	14.9	pm 4 alto dia
						%Cenizas	11.9	
						%Ext. Etér.	2.2	
						%FAD	33.6	
						%FND	63.1	
						%Lignina	4.5	
						%Proteína	21.9	
356808	09/09/2022	KIKUYO	Piso	#2	30	% Mat. Seca	15.9	pm 4 bajo
						%Cenizas	11.4	
						%Ext. Etér.	3.0	
						%FAD	33.0	
						%FND	57.9	
						%Lignina	5.1	
						%Proteína	22.7	
356809	09/09/2022	MEZCLA DE FORRAJES	Piso	#1	30	% Mat. Seca	17.5	kikuyo + estrella pt 5 alto
						%Cenizas	11.8	
						%Ext. Etér.	2.1	

COOPERATIVA DE PRODUCTORES DE LECHE DOS PINOS R.L. Apartado 179-4060 Alajuela C.R.
El presente informe de resultados no debe ser reproducido, excepto en su totalidad, sin aprobación de la Gerencia de Aseguramiento de la Calidad de la Cooperativa de Productores de Leche Dos Pinos R.L.

Anexo 1: Análisis bromatológico de forrajes

SOLICITANTE : Ovely Quirós R.
ASESOR TECNICO INTEGRAL

MUESTRA

FECHA REPORTE 22/09/2022
ASOCIADO GALLEGOS JIMENEZ ALFREDO
PROCEDENCIA Provincia CARTAGO Cantón ALVARADO Distrito PACAYAS

No. Silacc	Identificación	Lote	Días Corta	Ensayo	Resultado	
				%FAD	31.4	
				%FND	58.8	
				%Lignina	4.7	
				%Proteína	22.7	
356810	09/09/2022 MEZCLA DE FORRAJES Piso	#1	ni	% Mat. Seca	14.6	kikuyo + estrella pm abajo
				%Cenizas	12.4	
				%Ext. Etér.	2.2	
				%FAD	34.9	
				%FND	62.5	
				%Lignina	5.1	
				%Proteína	21.4	
356811	09/09/2022 MEZCLA DE FORRAJES Piso	#1	25	% Mat. Seca	15.2	kikuyo + estrella pt 10 alto
				%Cenizas	12.7	
				%Ext. Etér.	1.2	
				%FAD	33.5	
				%FND	63.7	
				%Lignina	5.4	
				%Proteína	24.4	
356813	09/09/2022 MEZCLA DE FORRAJES Piso	#2	25	% Mat. Seca	16.5	kikuyo + estrella potrero 9 dia
				%Cenizas	10.8	
				%Ext. Etér.	1.6	
				%FAD	34.3	
				%FND	65.1	
				%Lignina	4.8	
				%Proteína	20.3	

COOPERATIVA DE PRODUCTORES DE LECHE DOS PINOS R.L. Apartado 179-4060 Alajuela C.R.
El presente informe de resultados no debe ser reproducido, excepto en su totalidad, sin aprobación de la Gerencia de Aseguramiento de la Calidad de la Cooperativa de Productores de Leche Dos Pinos R.L.

Anexo 2. Análisis bromatológico de forrajes

SOLICITANTE : Ovely Quirós R.
ASESOR TECNICO INTEGRAL

MUESTRA

FECHA REPORTE 22/09/2022
ASOCIADO GALLEGOS JIMENEZ ALFREDO
PROCEDENCIA Provincia CARTAGO Cantón ALVARADO Distrito PACAYAS

No. Silacc	Identificación	Lote	Días Corta	Ensayo	Resultado
------------	----------------	------	---------------	--------	-----------

NOTAS:

- Las muestras fueron traídas al laboratorio por el interesado, por lo tanto los resultados reportados son válidos únicamente para las muestras analizadas
- Para el análisis de cada ensayo, se usaron los siguientes métodos:
 - Proteína, Fibra Acido D, Fibra Neutra D, Extracto Etéreo, Cenizas y lignina: Método de Espectroscopia Infrarroja Cercana (NIR), usando Infraxact, FOSS.
 - Materia seca: gravimetría, usando horno a (60 - 70) °C por 48 horas y horno a 135 °C, durante 2 horas.
 - Proteína cruda: AOAC, 2012: OMA 990.03. Método de combustión, Analizador Elemental.
 - Fibra ácida detergente y Fibra Neutro Detergente: Método Analizador ANKOM.
 - Micotoxinas: método UPLC- MS - MS.
 - pH: pH-mettler Toledo
- NA = No aplica NI= No indica
- Todos los resultados están dados en base seca (0 % de humedad).

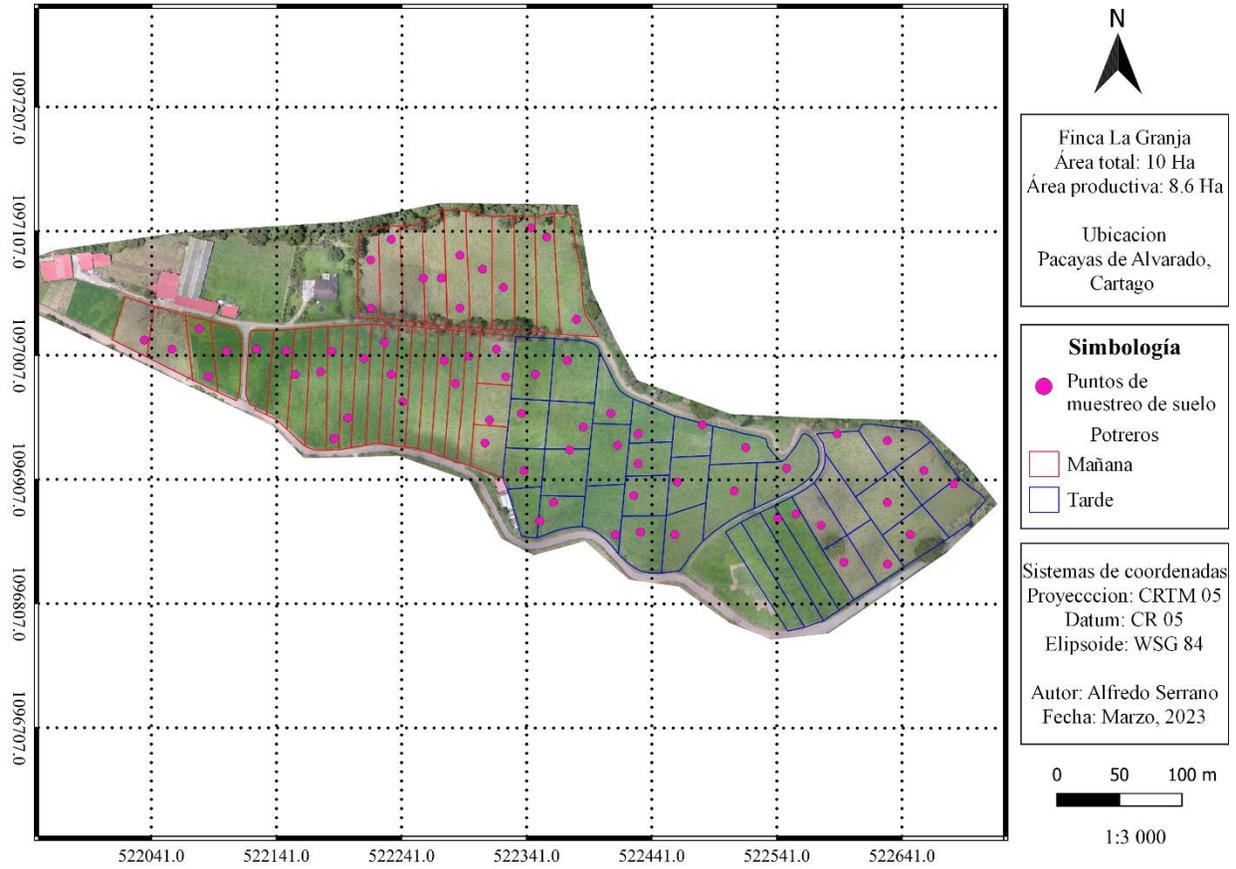
---Ultima Linea ---



BQ. Sandra Quirós Rojas
LABORATORIO DE CIRUELAS
TEL: 24373608-3609

COOPERATIVA DE PRODUCTORES DE LECHE DOS PINOS R.L. Apartado 179-4060 Alajuela C.R.
El presente informe de resultados no debe ser reproducido, excepto en su totalidad, sin aprobación de la Gerencia de Aseguramiento de la Calidad de la Cooperativa de Productores de Leche Dos Pinos R.L.

Anexo 3. Análisis bromatológico de forrajes



Anexo 4. Mapa de muestro de suelo.



Anexo 5. Punto de muestreo de forraje.