



Relaciones entre variables agro edafológicas de cuatro mezclas forrajeras con índices de vegetación en tres etapas de corte

Sarmiento Salazar, Juan Diego

Departamento de Ciencias de la Vida y de la Agricultura

Carrera de Ingeniería Agropecuaria

Trabajo de titulación, previo a la obtención del título de Ingeniero Agropecuario

Ing. Pérez Guerrero, Patricio Alejandro, Ph. D.

5 de agosto de 2022



Departamento de Ciencias de la Vida y la Agricultura
Carrera de Ingeniería Agropecuaria

Certificación

Certifico que el trabajo de titulación, **Relaciones entre variables agro edafológicas de cuatro mezclas forrajeras con índices de vegetación en tres etapas de corte** fue realizado por el señor **Sarmiento Salazar Juan Diego**, el cual ha sido revisado y analizado en su totalidad por la herramienta de verificación de similitud de contenido; por lo tanto cumple con los requisitos legales, teóricos, científicos, técnicos y metodológicos establecidos por la Universidad de las Fuerzas Armadas ESPE, razón por la cual me permito acreditar y autorizar para que lo sustente públicamente.

Sangolquí, 5 de agosto de 2022

Firma:



Firma digitalizada por:
**PATRICIO
ALEJANDRO PEREZ
GUERRERO**

.....
Ing. Pérez Guerrero, Patricio Alejandro, Ph. D.

C. C. 1802941011



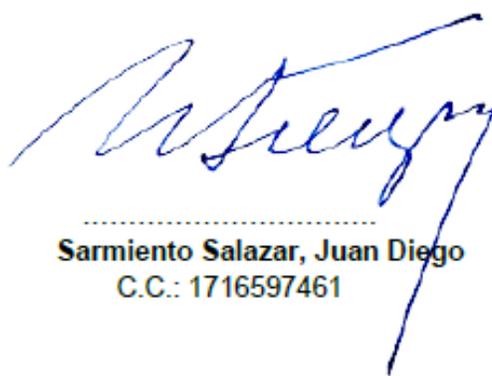
Departamento de Ciencias de la Vida y de la Agricultura

Carrera de Ingeniería Agropecuaria

Responsabilidad de Autoría

Yo Juan Diego Sarmiento Salazar, con cédula ciudadanía No. 1716597461, declaro que el contenido, ideas y criterios del trabajo de titulación: **Relaciones entre variables agro edafológicas de cuatro mezclas forrajeras con índices de vegetación en tres etapas de corte** es de mi autoría y responsabilidad, cumpliendo con los requisitos legales, teóricos, científicos, técnicos, y metodológicos establecidos por la Universidad de las Fuerzas Armadas ESPE, respetando los derechos intelectuales de terceros y referenciando las citas bibliográficas.

Sangolquí, 5 de agosto de 2022



.....
Sarmiento Salazar, Juan Diego
C.C.: 1716597461



Departamento de Ciencias de la Vida y de la Agricultura

Carrera de Ingeniería Agropecuaria

Autorización de Publicación

Yo **Sarmiento Salazar Juan Diego**, con cédula de ciudadanía No. 1716597461, autorizo a la Universidad de las Fuerzas Armadas ESPE publicar el trabajo de titulación: **Relaciones entre variables agro edafológicas de cuatro mezclas forrajeras con índices de vegetación en tres etapas de corte en el Repositorio Institucional**, cuyo contenido, ideas y criterios son de mi responsabilidad.

Sangolquí, 5 de agosto de 2022



.....

Sarmiento Salazar, Juan Diego
C.C.: 1716597461

Resultados de la herramienta para verificación y/o análisis de similitud de contenidos**TESIS JUAN DIEGO SARMIENTO V4.docx**

Scanned on: 16:33 August 3, 2022 UTC



Identical Words	871
Words with Minor Changes	0
Paraphrased Words	0
Omitted Words	2515

Firma:

Firmado digitalmente por:
PATRICIO
ALEJANDRO PEREZ
GUERRERO**Ing. Pérez Guerrero, Patricio Alejandro, Ph. D.**

C. C. 1802941011

Dedicatoria

La presente tesis la quiero de dedicar a mis abuelos Clara Nelly Richards y Jorge Salazar, que con su constancia y entrega me supieron empujar para cada día ser mejor y esforzarme más.

A mis padres, Clara y Fausto, que siempre me brindaron todo su apoyo y motivación para poder culminar mis estudios.

A mi hermana, que con su afecto me impulso a buscar una mejor versión de mí mismo.

A mis amigos y compañeros y a todas aquellas personas que han contribuido, para el logro de mi carrera universitaria.

Agradecimiento

El presente trabajo investigativo lo dedicamos principalmente a mis abuelos, por ser el inspirador y darnos fuerza para continuar en este proceso de obtener uno de los anhelos más deseados.

A mis padres, por su amor, trabajo y sacrificio en todos estos años, gracias a ustedes hemos logrado llegar hasta aquí y convertirnos en lo que somos. Ha sido el orgullo y el privilegio de ser sus hijos, son los mejores padres.

A mi hermana por estar siempre presentes, acompañándome y por el apoyo moral, que nos brindaron a lo largo de esta etapa de nuestras vidas.

A todo el personal del INIAP que me han apoyado y han hecho que el trabajo se realice con éxito en especial a aquellos que nos abrieron las puertas y compartieron sus conocimientos Ing. Javier Maiguashca e Ing. José Luis Rivadeneira.

Agradecemos a nuestros docentes de la Carrera de Ingeniería Agropecuaria por haber compartido sus conocimientos a lo largo de la preparación de nuestra profesión, de manera especial, al PhD. Patricio Pérez tutor del presente proyecto de investigación quien ha guiado con su paciencia, y su rectitud como docente para poder concluir con éxito esta investigación al Ingeniero Bryan Jaramillo por el apoyo para realizar esta investigación.

Índice de contenidos

Carátula	1
Certificación	2
Responsabilidad de autoría.....	3
Autorización de publicación.....	4
Resultados de la herramienta para verificación y/o análisis de similitud de contenidos.....	5
Dedicatoria.....	6
Agradecimiento.....	7
Resumen	16
Abstract.....	17
Capítulo I	18
Introducción.....	18
Antecedentes	18
Justificación.....	19
Objetivos	20
Objetivo general	20
Objetivos específicos.....	21
Hipótesis	21
Capítulo II.....	22
Revisión de literatura.....	22
Concepto de suelo	22
Textura del suelo.....	22

Estructura del suelo.....	23
Porosidad del suelo.....	23
Propiedades químicas del suelo.....	24
Horizontes del suelo.....	24
Horizonte O.....	24
Horizonte A.....	24
Horizonte B.....	24
Horizonte C.....	25
Humedad en el suelo.....	25
Humedad gravimétrica.....	25
Humedad aprovechable.....	26
Compactación del suelo y como medirla.....	26
Degradación del suelo.....	27
Rendimiento de pasturas.....	27
Pastos.....	27
Gramíneas.....	28
Rye Grass perenne (<i>Lolium perenne</i>).....	28
Leguminosas.....	28
Trébol blanco (<i>Trifolium repens</i>).....	29
Desarrollo fenológico del pasto.....	29
Importancia de pastos y forrajes.....	30

	10
Sensores Remotos en la agricultura.....	31
Teledetección.....	32
Firma espectral.....	32
Índices de vegetación.....	32
Índice de vegetación normalizada NDVI.....	32
Índice de coloración CI.....	33
Índice de suelo ajustado a la vegetación SAVI.....	33
Estudios previos de teledetección.....	33
Capitulo III.....	35
Materiales y Métodos.....	35
Ubicación del lugar de investigación.....	35
Taxonomía del suelo.....	36
Material vegetal.....	36
Materiales de campo.....	36
Equipos de laboratorio.....	37
Equipos de campo.....	37
Equipos de computación.....	37
Métodos.....	38
Humedad del suelo.....	39
Compactación del suelo.....	39
Rendimiento.....	40
Índice de Vegetación de Diferencia Normalizada (NDVI).....	40

	11
Índice de Coloración (CI).....	40
Índice de vegetación ajustada al suelo (SAVI).....	41
Datos espectrales.....	41
Imágenes espectrales	41
Diseño experimental del proyecto	42
Características del campo experimental.....	44
Análisis de varianza	44
Análisis funcional.....	45
Correlación.....	45
Análisis de regresión multivariable	46
Capitulo IV	47
Resultados y discusión.....	47
Resultados	47
Humedad Gravimétrica.....	47
Compactación del suelo	49
Rendimiento de pasturas.....	52
Normalized Difference Vegetation Index (NDVI).....	54
Soil Adjusted Vegetation Index (SAVI).....	56
Coloration Index (CI)	57
Correlaciones	59
Humedad gravimétrica.....	59
Compactación del suelo.	61

Rendimiento de pasturas.....	63
Análisis de regresión múltiple	65
Humedad gravimétrica.....	65
Compactación del suelo	66
Rendimiento	67
Capítulo V	69
Conclusiones y recomendaciones	69
Conclusiones.....	69
Recomendaciones.....	70
Bibliografía.....	71

Índice de tablas

Tabla 1	Clasificación de la textura de suelos	23
Tabla 2	Características de la Estación Experimental Santa Catalina (Pichincha)	35
Tabla 3	Taxonomía del suelo.....	36
Tabla 4	Tratamientos en estudio.....	42
Tabla 5	Características del campo experimental.	44
Tabla 6	Esquema de análisis de varianza.....	44
Tabla 7	Análisis de varianza para humedad gravimétrica.	47
Tabla 8	Prueba de Tukey al 5% para humedad gravimétrica para tratamiento	48
Tabla 9	Prueba de Tukey al 5% para humedad gravimétrica promedio de medias de corte	48
Tabla 10	Prueba de Tukey al 5% para humedad gravimétrica en base e repeticiones.	48
Tabla 11	Análisis de varianza para compactación del suelo	50
Tabla 12	Prueba de Tukey al 5% para compactación en base de tratamientos.	50
Tabla 13	Prueba de Tukey al 5% para humedad gravimétrica en base de corte.....	50
Tabla 14	Prueba de Tukey al 5% para humedad gravimétrica para repeticiones.	51
Tabla 15	Análisis de varianza para rendimiento de las pasturas.....	52
Tabla 16	Prueba de Tukey al 5% para rendimiento de pasturas para tratamiento	52
Tabla 17	Prueba de Tukey al 5% para rendimiento de pasturas para corte	53
Tabla 18	Prueba de Tukey al 5% para rendimiento de pasturas para repeticiones	53
Tabla 19	Análisis de la varianza NDVI.....	54
Tabla 20	Prueba Tukey 5% para NDVI promedio entre tratamientos.....	55
Tabla 21	Prueba Tukey 5% para NDVI promedio entre cortes.....	55
Tabla 22	Análisis de la varianza SAVI	56
Tabla 23	Prueba Tukey 5% para SAVI promedio entre tratamientos.	56
Tabla 24	Prueba Tukey 5% para SAVI promedio entre corte.....	57

Tabla 25	Análisis de la varianza CI.....	58
Tabla 26	Prueba Tukey 5% para CI promedio entre tratamientos.....	58
Tabla 27	Prueba Tukey 5% para CI promedio entre cortes.....	58
Tabla 28	Coeficientes de regresión y estadísticos asociados.	65
Tabla 29	Análisis de la varianza para comprobar el modelo	66
Tabla 30	Coeficientes de regresión y estadísticos asociados.	66
Tabla 31	Análisis de la varianza para comprobar el modelo	67
Tabla 32	Coeficientes de regresión y estadísticos asociados.	67
Tabla 33	Análisis de la varianza para comprobar el modelo	68

Índice de figuras

Figura 1	Imagen satelital de la ubicación del lugar de investigación.....	35
Figura 2	Croquis experimental aplicado al ensayo	43
Figura 3	Grafica de humedad gravimétrica por tratamiento y repetición vs corte.....	49
Figura 4	Grafica de barras de la compactación del suelo tratamiento y repetición vs corte.	51
Figura 5	Grafica de barras del rendimiento de pasturas tratamiento y repetición vs corte.	54
Figura 6	Correlación de Pearson entre la humedad gravimétrica y NDVI	59
Figura 7	Correlación de Pearson entre la humedad gravimétrica y SAVI	60
Figura 8	Correlación de Pearson entre la humedad gravimétrica y CI.....	60
Figura 9	Correlación de Pearson entre la compactación del suelo y NDVI.....	61
Figura 10	Correlación de Pearson entre la compactación del suelo y SAVI	62
Figura 11	Correlación de Pearson entre la compactación del suelo y CI.....	62
Figura 12	Correlación de Pearson entre rendimiento de pasturas y el NDVI.....	63
Figura 13	Correlación de Pearson entre rendimiento de pasturas y el SAVI	64
Figura 14	Correlación de Pearson entre rendimiento de pasturas y el CI.....	64

Resumen

El presente estudio busca caracterizar y correlacionar las variables agro edafológicas con tres índices de vegetación, obtenidos a partir de sensores remotos, en cuatro diferentes proporciones de Rey Grass Perenne y trébol blanco, antes y después del pastoreo.

Las variables edafológicas evaluadas fueron: la humedad gravimétrica, tomada en el campo a tres profundidades (0 – 10, 0 – 20 y 0 – 30 centímetros); luego de ser procesadas en laboratorio, se obtuvo un promedio para tener el porcentaje de humedad gravimétrica de 0 a 30 centímetros de profundidad; y, la compactación del suelo, tomada en el campo con el equipo Field Scout, que leyó cada centímetro de profundidad para, posteriormente, calcular el promedio de compactación del suelo a una profundidad de 0 a 30 centímetros. La variable agronómica corresponde al rendimiento de las pasturas, que se tomó en el campo con un marco de 1m x 1m, que se procesó en laboratorio para obtener la equivalencia Tn/ha. Los índices de vegetación se tomaron en el campo con una cámara multispectral Parrot Sequoia, y los datos se procesaron en el laboratorio.

Los resultados indican cómo las variables agro edafológicas se muestran negativamente afectadas después del pastoreo, esto se corroboró con los índices de vegetación, que, de igual forma, mostraron como decrecían después de la alimentación del ganado. En el caso de la correlación se mostró una fuerte interacción entre las variantes edafológicas y el índice de vegetación Ci. La variable agronómica de rendimiento presentó una correlación fuerte y positiva con el índice de vegetación SAVI, que influenciará en el posterior desarrollo del modelo predictivo. Se obtuvieron modelos de estimación con análisis de regresión múltiple para las variables agro edafológicas usando los tres índices de vegetación, para que se puedan calcular las mismas sin necesidad de tomar muestras en el campo.

Palabras clave: Mezcla forrajera, Variables agroedafológicas, Índices de vegetación, Modelos predictivos.

Abstract

The survey, herein, intends to characterize and correlate the agricultural edaphological variables, with three vegetation indexes, obtained from remote sensors, in four different proportions of perennial Rye Grass and white clover, before and after grazing;

the evaluated edaphological variables will be the gravimetric moisture taken at three depths (0 – 10, 0 - 20, and 0 – 30 centimeters); later on, after been processed at the laboratory, the average will be calculated in order to obtain the moisture gravimetric percentage at a 0 to 30 cm depth, and the ground compaction obtained in the field with the Field Scout that read each depth centimeter, in order to obtain, later on, the ground's compaction average, at a 0 to 30 centimeters depth. The agronomical variable will be the yield of the pasture, which was taken in a 1 square meter frame, and processed in the laboratory to obtain the Ton/hectare equivalence. The vegetation indexes were taken in the field with a Parrot Sequoia Multispectral camera, and the data was processed at the laboratory.

The results show how the edaphological variables are affected negatively after grazing; this was corroborated, later on, by the vegetation indexes which, likewise demonstrated how they decreased after the cattle was fed. In the correlation case, it showed a strong interaction between the edaphological variants and the «Ci» vegetation index. The agronomical yield variable presented a strong and positive correlation with the vegetation «SAVI» index, which will influence later in the development of the predictive model. Estimation Models were obtained by multiple regression analysis for the agro edaphological variables, by using the three vegetation indexes, in order to calculate them without the need to pick field samples.

Keywords: Forage Mixture, Agro edaphological Variables, Vegetation Indexes, Predictive Models.

Capítulo I

Introducción

Antecedentes

La superficie de suelo destinada a la agricultura en Ecuador corresponde a 5.018.121 hectáreas de las cuales para pastoreo se destina un 55.45%, dentro de este promedio el 41.60% corresponde a pasto sembrado y 13.85% a pasto natural. Esto vuelve a los pastizales como el cultivo con mayor superficie en el Ecuador. (León et al., 2018)

Para el ámbito agrícola el suelo es considerado como un activo no renovable y es indispensable para la producción pecuaria ya que brinda una fuente de alimentos de bajo costo y con alto contenido de nutrientes. Este recurso se encuentra influenciado por muchas variables como es la humedad que a su vez está relacionada con la porosidad, contenido y disponibilidad de nutrientes, estructura del suelo y la presencia de microbiota, lo cual afectara las variables agronómicas tanto de manera positiva como negativa. (González et al., 2008)

Como se mencionó anteriormente tanto las variables agronómicas como edafológicas influenciarán el desarrollo y producción de pasturas en todas sus etapas (germinación, desarrollo y cosecha). Si las variables no cumplen con los requerimientos de la pastura que se esté usando se podrán visualizar depresiones muy marcadas en su producción sea en rendimiento como en la calidad nutricional contenida por el pasto (Formoso, 2008).

En el caso de la variable humedad el estándar para una buena producción de pastos se encuentra aproximadamente en un valor de 34% que corresponde a capacidad de campo la cual se da después de que el suelo paso por saturación y en sus poros quedo un balance tanto de agua como de aire, esta agua se encuentra contenido en poros que permiten a planta absorber esta agua. (Medina, 2016)

En la actualidad el uso de tecnologías aeroespaciales nos brinda una herramienta para mejorar el rendimiento de los cultivos, esto en un mundo globalizado y de continuo crecimiento es de gran ayuda ya que la superficie terrestre para la producción agrícola no está aumentando mientras que la población si aumenta, al igual que la necesidad de alimentos de alto valor nutricional y bajo costo (Sönmez et al., 2008).

El uso de sensores remotos ayuda a predecir y controlar a un cultivo otorgando una herramienta de evaluación no destructiva,(Luis et al., 2005) con estas herramientas no se requiere la presencia in situ del investigador, presenta bajos costos ya que no es necesario tener laboratorios de alta gama y por ultimo con las tecnologías aeroespaciales se puede trabajar con todo el cultivo dando información más precisa que ayude al productor a tomar decisiones sobre su cultivo (González et al., 2008).

Con el uso de sensores remotos se puede calcular los índices de vegetación, los cuales si se usan desde el establecimiento del cultivo hasta su cosecha se obtendrá datos precisos del desarrollo de la pastura con relación al tiempo, esto permitirá actuar de forma más rápida y precisa en fertilización y control de enfermedades, a comparación de otros métodos ya existentes que requieren de muestras tomadas en campo, al estar sujetas al error humano pueden dar un sesgo en los resultados finales (Marcial & Ojeda, 2017).

Justificación

El aumento de la población mundial en la actualidad está llevando a que la agricultura ocasione cambios negativos a los recursos naturales como al suelo y agua, en nuestro país el recurso suelo se encuentra con grandes retos ya que la explosión demográfica cada vez mayor reduce las áreas para explotación agropecuaria produciendo una baja producción de alimentos y un alto costo de los mismos (Nieto et al., 2002).

Con este rápido crecimiento poblacional también se han creado nuevas tecnologías como son los sensores remotos fusionados con la agricultura nos permiten predecir, controlar y precautelar los cultivos de posibles pérdidas. Con el uso de estos sensores se pueden calcular los índices de vegetación siendo estos una herramienta para mejorar la percepción del manejo tanto de los cultivos como de los recursos naturales dándonos un mejor criterio para la toma de decisiones ya que permite tener una visión más globalizada y real de lo que se está produciendo.

En el presente estudio se incluirá tecnología en los procesos agropecuarios, mediante la comparación de productos de sensores remotos a partir de los índices de vegetación y suelo; estos, permitirán desarrollar un modelo predictivo a partir de las respuestas espectrales características de cada muestra de proporción forrajera con la finalidad de obtener un modelo que permita predecir tanto las variables edafológicas como las agrícolas de la pastura; puesto que los métodos de evaluación tradicionales de estas variables demandan una elevada cantidad de tiempo, costo y mano de obra para obtener resultados producibles. Por lo tanto, es importante obtener un modelo predictivo que los resultados estén en un menor tiempo sin necesidad de laboratorios externos y destrucción del pasto; para así de esta manera contribuir al conocimiento investigativo en la producción de pastos y mejorar la economía del productor agropecuario del país.

Objetivos

Objetivo general

Determinar la relación entre variables agro edafológicas de cuatro mezclas forrajeras con tres índices de vegetación en tres etapas de corte.

Objetivos específicos

Evaluar las variables agras edafológicas de cuatro mezclas forrajeras en tres etapas de corte.

Determinar la relación entre las variables agro edafológicas y tres índices de vegetación

Hipótesis

Ho: La mezcla forrajera compuesta por 20% trébol blanco y 80 % de rye grass perenne presenta mayor rendimiento que la mezcla forrajera compuesta por 0% trébol blanco y 100% rye grass.

Ho: El índice de vegetación de suelo desnudo tiene una relación directamente proporcional a la humedad y compactación del suelo.

Hi: La mezcla forrajera compuesta por 20% trébol blanco y 80 % de rye grass perenne presenta menor rendimiento que la mezcla forrajera compuesta por 0% trébol blanco y 100% rye grass.

Hi: El índice de vegetación de suelo desnudo no tiene una relación directamente proporcional a la humedad y compactación del suelo.

Capítulo II

Revisión de literatura

Concepto de suelo

Al suelo se lo puede considerar como una conjunción de diversas partículas de procedencia tanto orgánica la cual se encuentra formada por átomos de carbono y que es sinónimo de vida como inorgánica procedente de los minerales presentes sobre la superficie, estos serán distintos dependiendo del lugar de procedencia ya que su composición se ve influida directamente por los cambios físicos, químicos y naturales; como la microbiota del sitio, el clima en específico donde se encuentren ubicados. En lo que es el ámbito agrícola podemos considerar el suelo como un activo no renovable que da sostén, nutrientes para las plantas y sirve como compostera para degradar los residuos que producimos. (Ravi et al., 1968).

En el suelo es posible encontrar todos los estados de la materia en el caso de los líquidos, se encuentran contenidos dentro de la porosidad del suelo y llegan a representar entre un 25% a 30 % de la composición del suelo, en el caso de los sólidos tenemos todas las partículas minerales con un promedio de 45% a 50% (Novillo Espinoza et al., 2018) Y por último el estado gaseoso, igual que el estado líquido se encuentra contenido en los poros del suelo y representa un 10% a 15% de su composición (Flores & Lesino, 2016)

Textura del suelo

La textura se define como el contenido de las partículas de diferente tamaño definiendo a estas partículas como arena, limo y arcilla. Esto tiene que ver con la facilidad que se puede trabajar con el suelo, la cantidad de poros presente en el suelo u la velocidad con la que el agua penetra y atraviesa el suelo. (Fernández & Trillo, 2005)

Tabla 1*Clasificación de la textura de suelos*

Arenoso	Limoso	Arcilloso	Clase textural
86-100	0-14	0-10	Arenoso
70-86	0-30	0-15	Franco arenoso
50-70	0-50	0-20	Franco arenoso
23-52	28-50	7-27	Franco
20-50	74-88	0-27	Franco limoso
0-20	88-100	0-12	Limoso
20-45	15-52	27-40	Franco arcilloso
45-80	0-28	20-35	Franco arenoso arcilloso
0-20	40-73	27-40	Franco limoso arcilloso
45-65	0-20	35-55	Arcilloso arenoso
0-20	40-60	40-60	Arcilloso limoso
0-45	0-40	40-100	Arcilloso

Nota. Recuperado de FAO. Copyright 2016 por FAO. Reprinted with permission.

Estructura del suelo

La definición de estructura del suelo es la unión de agregados que da estabilidad en el tiempo y espacio, esta es una propiedad más importante del suelo que puede indicar la calidad de este mismo. El correcto crecimiento de las raíces de la planta estará influenciado por la estructura del suelo y esto a su vez traerá consecuencias a la parte aérea de la planta ya que sin un buen sostén y nutrientes no habrá un desarrollo de la planta (Osuna-Ceja et al., 2006).

Porosidad del suelo

La porosidad es una relación del volumen que considera el volumen de vacíos y el volumen total de la masa de suelo, el volumen de vacíos está conformado por dos fases del suelo, el de agua y aire mientras que la masa de suelo; constituida por tres volúmenes el volumen e aire agua y sólidos (Osuna-Ceja et al., 2006). Se le puede clasificar por dos características principales que son la capacidad de conducción y almacenamiento de lo cual obtenemos tres tipos de porosidades, la submicroscópica que son poros relativamente pequeños que no permiten el almacenamiento y tránsito del agua, la porosidad capilar los cuales son poros idóneos para la explotación agrícola ya que almacenan agua la cual se

encuentra disponible para la planta y los macroporos que son producidos por la erosión y labranza excesiva de la zona (González-Barrios et al., 2012).

Propiedades químicas del suelo

Los minerales y la materia orgánica serán las principales influencias para las propiedades químicas del suelo porque dominaran de forma directa los nutrientes y su disponibilidad en el suelo (Chávez, 2010). Estos nutrientes están divididos en dos grupos los micro y macro nutrientes que estarán presentes y disponibles dependiendo de las propiedades químicas y físicas del suelo (Avila, 2019).

Horizontes del suelo

El suelo posee una serie de capas, su secuencia se la conoce como perfil del suelo, las capas o también llamadas horizontes nos indican todo lo que interviene en la configuración de un suelo, desde la roca hasta e aumento de la materia orgánica (Enrique García, 2020)

Horizonte O

Es la capa externa del suelo que está compuesta por la materia orgánica en estado de descomposición.

Horizonte A

Capa superficial del suelo, orgánicamente rica cuenta con minerales, pero estos ocasionalmente son arrastradas por el agua subterránea. Se considera la parte más importante del suelo para la producción agrícola ya que aquí se fija el sistema radicular de la planta y de este toma los nutrientes y agua (Moreno & Ibañez, 2020).

Horizonte B

Poco orgánico, rico en minerales procedentes por el arrastre del agua del horizonte A.

Horizonte C

Corresponde a la roca madre esta al descomponerse se rompe y disgrega trozos sueltos, no contiene material orgánico.

Humedad en el suelo

Una definición precisa de la humedad de suelo es, la cantidad de agua presente por volumen de suelo en un sitio determinado (Herrera Puebla et al., 2016). Según (Elisei, 2017) hay una estrecha relación entre la compactación del suelo y la humedad ya que al compactarse el suelo por factores naturales o artificiales, este pierde o disminuye su porosidad en la cual se almacena depósitos de agua afectando así a la planta.

En la actualidad la alta exigencia de pastoreo está trayendo malas prácticas de labranza y pastoreo lo cual afecta a la estructura del suelo provocando un bajo contenido de humedad aprovechable, esto se puede observar con saturación de agua en las capas externas del suelo y bajo contenido de agua en las capas internas afectando la parte radicular de la planta, disminuyendo el rendimiento y calidad nutricional de los cultivos (Núñez-Ramírez et al., 2020).

Para medir la humedad del suelo existen métodos en campo y laboratorio, en el caso del campo el método es relativamente sencillo y consiste en realizar un tacto con la palma de la mano y ver la cantidad de agua que expulsa el suelo, esta técnica necesita de experiencia del técnico (Martin & Muñoz, 2010). El método de laboratorio consiste en la toma en campo de una muestra sustancial de suelo para después secarlo en el laboratorio y realizar una relación entre el peso del suelo húmedo y seco con el volumen de la muestra tomada (Curto et al., 2016).

Humedad gravimétrica

Este método se considera el más exacto para medir el contenido de humedad y se toma como referencia para calibrar equipos utilizados para otros métodos de medición de humedad, este método consiste en la toma de una muestra de suelo en campo, se pesa esa muestra y se

le procede a secar en estufa a 105°C por 12 horas después se toma el peso y se aplica la fórmula de humedad gravimétrica para obtener su resultado (Elisei, 2017).

Humedad aprovechable

La humedad aprovechable es una de las principales variables del suelo ya que esta variable se relaciona con la productividad del sistema agropecuario. La humedad aprovechable es inherente al tipo de suelo y es modificado por las prácticas agrícolas, que su valor es específico del sitio (Salcedo et al., 2007). El cambio del uso del suelo y manejo agrícola han modificado la capacidad del suelo de retener agua y en si la humedad aprovechable, esto se encuentra relacionado con el contenido de materia orgánica cada vez más bajo y el alto uso de fertilizantes inorgánicos, plaguicidas y labranza intensiva. (Castro-Popoca et al., 2008)

Compactación del suelo y como medirla

La compactación del suelo es un fenómeno que puede ser causado por seres vivos o de forma natural en el cual se altera la estructura del suelo (Blanco-Sepúlveda, 2009), este proceso se da en suelos que se encuentran sin agua en sus poros, se le aplica una fuerza durante un tiempo corto sin que se expulse la totalidad de agua (Laureda et al., 2016), este fenómeno también puede ser causado por su propio peso, por lluvias o por el encogimiento como resultados de prolongados lapsos de sequías, podemos relacionarlo con la falta de porosidad de un suelo o aumento de la densidad aparente del mismo que se produce por someter a cargas por un corto tiempo por maquinaria agrícola o por el pastoreo de animales (Torres et al., 2017).

Existen varios métodos para medir la compactación del suelo, pero el más práctico y simple es el uso de un penetrómetro, su función principal es medir la resistencia del suelo, mientras menor sea la medida, mayor la concentración de aire, mejor vida microbiana y mejor el entorno para el desarrollo de las raíces de las plantas (Bárcena & Cozzi, 2016).

Degradación del suelo

La degradación del suelo se da por diversos factores que pueden ser tanto físicos como químicos, entre los factores físicos más importantes está la compactación ya que esta altera las propiedades del suelo como la porosidad, la disponibilidad de nutrientes y la presencia de microorganismos, etc afectando a futuro en el rendimiento de los pastizales (Medina, 2016). El pisoteo producido por los animales puede ocasionar una disminución significativa del movimiento interno del agua y un aumento de la densidad aparente, a consecuencia de eso la porosidad disminuiría y afectaría a la relación suelo-agua-aire lo que no permitiría un correcto desarrollo de las raíces de las plantas (Ruiz et al., 2010).

Rendimiento de pasturas

El rendimiento se entiende como producción total del pasto por hectárea de terreno utilizado y se mide usualmente en toneladas métricas por hectárea (T.M./ha.) (Hernández-Garay et al., 2012). El rendimiento de un cultivo está estrechamente ligado a tres características genéticas: productividad potencial, rusticidad y condiciones ambientales (Espitia et al., 2012) El rendimiento en pastos se mide con la ayuda de un marco, este se lo lanza de forma aleatoria en el terreno se corta ese pasto y se lleva laboratorio a pesar, se hace una estimación con una regla de tres simple para una hectárea (Vega Britz et al., 2022).

Pastos

Para los animales herbívoros con fines de explotación productiva sea de leche o de carne, los pastos constituyen la principal fuente de nutrientes para su alimentación, siendo esta una herramienta para mejorar la producción como una fuente de alimento de bajo costo con una calidad nutricional completa (flujo de energía, fibra y proteína) (Collaguazo, 2014)

Una de las características más importantes que tienen los pastos es soportar el pisoteo de los animales junto con su gran capacidad de rebrotar. Estas son plantas superiores y

autótrofas lo que quiere decir que producen su propio alimento, toman minerales y agua disponibles en el suelo extraídas por la raíz y junto con la luz solar realizan el proceso de fotosíntesis para alimentarse.

Gramíneas

Las gramíneas representan el porcentaje más grande e importante de forraje para la alimentación de ganado. Todos los países productores de leche utilizan las gramíneas y los granos como la base principal para la nutrición animal.

De este gran grupo de forrajes usados para la nutrición animal, los pastizales perennes son las más cultivadas, por sus bondades de gran rebrote y resistencia al pisoteo de los animales (INIAP, 2011).

Rye Grass perenne (Lolium perenne)

El Rye grass se caracteriza por crecer en forma de matas muy densas junto con abundantes macollos y follaje, por el motivo anteriormente mencionado su altura puede variar de 30 – 60 cm. En el transcurso de su crecimiento se puede visualizar hojas cortas sin la presencia de vellosidades y rígidas plegadas en la yema, en el envés se observa un color verdoso oscuro muy brillante, los tallos vegetativos son erectos, con abundantes hojas que surgen intravaginalmente. Tienen espigas delgadas y poco rígidas, su sistema radicular superficial y denso motivo por el cual es muy sensible a cambios bruscos de agua en el suelo y también es un motivo para que esta planta tenga una buena respuesta a la fertilización nitrogenada (Gaon, 2018).

Leguminosas

Las leguminosas son plantas que tienen la capacidad de sintetizar altos niveles de proteína y a su vez esta proteína no se ve disminuida con el paso del tiempo y el crecimiento de la planta, para la ganadería presenta numerosas bondades como una fuente importante de proteínas de buena calidad, esto porque contienen aminoácidos esenciales que les hacen

superiores a las gramíneas, son ricas en calcio y presentan bajos niveles de fibras en comparación con las gramíneas lo que les hace de fácil digestión para el ganado. (Meza Bone et al., 2014)

Ya mencionadas las bondades de las leguminosas de igual manera estas presentan unos pocos aspectos negativos para la alimentación bovina como son que pueden presentar sustancias anti metabólicas que producen efectos tóxicos en ellos animales, el consumo excesivo estas plantas puede causar problemas severos sobre todo cuando se unas como una fuente exclusiva de proteínas. (García-Ferrer et al., 2015)

Trébol blanco (*Trifolium repens*)

El trébol blanco es una leguminosa que está presente en las praderas ecuatorianas esto debido a su rebrote, y cantidad de proteína que contiene. El trébol blanco es una planta de crecimiento postrado que se desarrolla en base a tallos rastreros denominados estolones que cumplen una función equivalente a los macollos en las gramíneas (Teuber, 1967).

Desarrollo fenológico del pasto

La fenología de pastos denota distintas etapas por las que pasa una planta en su desarrollo, esto siguiendo un ritmo de brotación, floración y dispersión de semilla. Estos aspectos fenotípicos pueden variar por la latitud y altitud de la zona de estudio, época en que se realiza las observaciones, tipo de suelo, genotipo empleado, entre otros (Collaguazo, 2014)

Al igual que muchos procesos naturales el crecimiento de los pastizales sigue una función sigmoidea, desde su siembra hasta llegar a su estado estable que se alcanza cuando la canopia intercepta la radiación, lo que produce el desarrollo de nuevas hojas, raíces y tallos que equivalen a la muerte de órganos viejos y rejuvenecimiento de la planta.

Para el desarrollo de las gramíneas se pueden denotar tres etapas definidas (brotación, floración y dispersión de semilla) por el porcentaje de desarrollo foliar y el porcentaje que se cubre el suelo. (INIAP, 2011)

Conocer sobre la fenología de los pastos es útil para el desarrollo ganadero en especial en épocas de siembra, aplicaciones de riego, épocas de cosecha, movimientos de mano de obra, etc. Determinar zonas óptimas para el correcto desarrollo de los pastos permite tener praderas en periodos relativamente pequeños y con un buen contenido nutricional.

Importancia de pastos y forrajes

En la antigüedad después de la domesticación de los animales se volvió de suma importancia la producción de pastos para su alimentación (Yepes, 1997) En el Ecuador los pastos suponen el alimento más barato y nutritivo para el ganado, brindando de nutrientes necesarios para una correcta homeostasis en el animal que conlleve a una alta producción de leche o carne (León et al., 2018). La superficie de pastos sembrados en nuestro país es cada vez más grande en comparación de cualquier otro cultivo, según el INEC la superficie agropecuaria es de 5 421 111 hectáreas y en esta superficie entre pastos cultivados y naturales tenemos un 58.53% (ESPAC, 2021).

El correcto uso de los pastizales nos aportara alimentos de origen animal saludables. La alimentación del ganado debe basarse principalmente en pastos que son altos en contenido nutricional y presentan un bajo valor económico, además que este alimento no presenta competencia para la dieta del ser humano como lo son el consumo de trigo, maíz, cebada, etc que con un correcto manejo de los pastos estos solo se utilizarían de manera estratégica y preferiblemente como subproductos de la industria. (León et al., 2018)

Sensores Remotos en la agricultura

El uso de sensores remotos en la agricultura nos facilita aplicar la cantidad correcta de insumos, en el momento adecuado y en el lugar exacto cumpliendo con los requerimientos precisos del cultivo. (Emiliano García & Flego, 2005). Una gran ventaja del uso de tecnologías de la información en la agricultura es que podemos realizar un análisis de resultados por sectores distintos dentro de un mismo ensayo y de esta manera se puede ajustar el manejo diferencial dentro del mismo lote (Leiva, 2003). Un ejemplo de lo anteriormente mencionada es el rendimiento de dos cultivos pueden ser distintos por fallas geográficas como lomas o laderas, usando tecnologías de la información podemos dar un manejo diferenciado a este cultivo usando una nutrición adecuada para cada parte del cultivo.

En países desarrollados los sensores remotos se mezclan con sistemas de posicionamiento geográfico, sistema de información geográfica, programas de computadoras para la elaboración de mapas, maquinaria y equipos para la aplicación de los insumos capaces de variar la cantidad aplicada por un software, esta mezcla de tecnologías a dado pie a la agricultura de precisión (Leiva, 2003). Con la actual situación del mundo en cuanto a contaminación, crecimiento demográfico y cambios climáticos el uso de la agricultura de precisión da una mejor visualización del requerimiento preciso del cultivo además de permitir el ahorro de insumos y un crecimiento económico para el productor.

El proceso de agricultura de precisión inicia con la determinación de rendimientos en el mapa de los cultivos lo cual permita junto con otro software construir un sistema de soporte de decisiones con el cual se diseña un mapa de tratamientos de acuerdo con la variabilidad de los rendimientos, el mapa se instala en el software del tractor para que este controle de manera precisa la aplicación de los distintos insumos.

Teledetección

La teledetección es una técnica que permite la toma, procesamiento y análisis de un objeto, área o fenómeno situado a distancia sobre la superficie terrestre, marina o atmósfera, a través de imágenes capturadas por medio de sensores aéreos o espaciales Haga clic o pulse aquí para escribir texto. (Chuvienco, 2006).

El flujo de radiación que parte de los objetos y se dirige hacia el sensor hay tres formas diferente; reflexión que es la radiación de luz solar que impacta el objeto y es reflejada; la emisión, es radiación terrestre que parte del objeto según sus características y la emisión-reflexión, se refiere la radiación del sensor y reflejada por el objeto. (Manzano & Oña, 2016)

Firma espectral

La firma espectral es única por cada objeto, esto permite visualizar el comportamiento en términos de energía reflejada, frente a la longitud de onda que se conoce como curva espectral. Cada tipo de pastura posee distintos comportamientos y es a estos comportamientos lo que denominamos firma espectral que nos ayuda a identificar varias formas de cobertura vegetal, suelo y agua. (Sarría, 2006)

Índices de vegetación

Existen varios índices adecuados para la interpretación de diferentes tipos de coberturas como: caracterización de la vegetación, suelo, tipos de minerales, detección de humedad (Chuvienco, 2006).

Índice de vegetación normalizada NDVI

Uno de los principales índices es el NDVI—"Normalized Difference Vegetation Index" (por sus siglas en inglés), este índice relaciona la energía absorbida y emitida por la vegetación

respecto a la radiación de determinadas bandas del espectro electromagnético (Infrarrojo cercano-NIR y Rojo-R), las cuales son captadas por sensores (Meneses, 2011).

Índice de coloración CI

El índice de coloración que es el cálculo que ayuda a diferenciar entre tipos de suelos, se usa las bandas verdes y rojas. Valores bajos de este índice están relacionados con la presencia de alta concentración de carbonatos y sulfatos mientras que valores altos de este índice con suelos áridos (Bahadur, 2018).

Índice de suelo ajustado a la vegetación SAVI

El índice de vegetación ajustada al suelo (“Soil Adjusted Vegetation Index – SAVI”) es utilizado para corregir el NDVI, el SAVI se calcula como una relación entre los valores R y NIR con un factor de corrección de la luminosidad del suelo (L) que varía según la densidad de la vegetación y que está relacionado con la reflectividad del suelo (Landsat Missions, 2022).

Estudios previos de teledetección.

En el Ecuador, la teledetección dirigida a la producción de las pasturas se ve limitado a escasos trabajos de investigación, donde el uso de los índices espectrales y la relación con plataformas aéreas no tripuladas en pastos reducen notablemente los costos de monitoreo en relación a la agricultura convencional, el uso de sensores remotos determinó que el análisis mediante plataformas aéreas presenta mejores resultados para la evaluación en las pasturas (Cevallos et al., 2018).

Uno de los estudios relacionados con índices de vegetación en la región sierra del Ecuador en pasto predominantes de las mismas según (Sinde et al., 2020), el estudio tuvo como finalidad de identificar la relación que tiene los índices de vegetación y las variables físicas del suelo en tres especies forrajeras (kikuyo, rye grass anual, rye grass perenne) con y sin fertilización, mediante el uso de estas técnicas de bajo costo se obtiene diferencias en

cuanto a sus índices, en general se pudo afirmar que la vigorosidad del cultivo no se vio afectada por las características del suelo, en especial al cultivo rye grass, lo que hace entender la facilidad de este cultivo para adaptarse a condiciones no adecuadas para su desarrollo, obteniendo información sobre firmas espectrales.

En el estudio realizado por (Gaon, 2018) se analizaron los índices de vegetación por radiometría en relación a la digestibilidad de dos gramíneas forrajeras, donde se apreció que los valores más altos de digestibilidad en el segundo corte son para Rye grass perenne de 61,44% con fertilización y 50.57% sin fertilización, cuyos valores se encuentran relacionados con NDVI de 0.56 y 0.41. Para Rye grass anual se presenta de 60.73% con fertilización y 52.36% sin fertilización con NDVI de 0.53 y 0.42, considerados valores apropiados para la predicción.

Capítulo III

Materiales y Métodos

Ubicación del lugar de investigación

La presente investigación se realizará en las parcelas del Programa Nacional de Ganadería y Pastos de la Estación Experimental Santa Catalina (E.E.S.C) en Pichincha cuyas características políticas, geográficas y ambientales se presentan en la tabla 2.

Figura 1

Imagen satelital de la ubicación del lugar de investigación



Nota. Ubicación lugar de investigación tomado de Google Earth

Tabla 2

Características de la Estación Experimental Santa Catalina (Pichincha)

Detalle	Características
Provincia	Pichincha
Cantón	Mejía
Parroquia	Cutuglagua
Latitud	00° 22' 00'' S
Longitud	78° 33' 00'' O
Altitud	3058 msnm
Humedad relativa (%)	79
Temperatura promedio anual (°C)	12
Precipitación promedio anual(mm)	1300

Nota. Características de la zona experimental Santa Catalina

Taxonomía del suelo

En la tabla 3 se explica la taxonomía de suelo del sitio experimental.

Tabla 3

Taxonomía del suelo

Detalle	Características
Orden	Andisols
Suborden	Udands
Gran grupo	Hapludands
Subgrupo	Vitric hapludands
Textura	Franco
Color	Negro

Nota. Taxonomía del suelo presente en Santa Catalina

Material vegetal

Para la presente investigación se usó semillas de leguminosas (trébol blanco Ladino gigante) y gramíneas forrajeras (rye grass perenne Ohau).

Materiales de campo

- Estacas
- Piolas
- Fundas plásticas
- Fundas de papel
- Postes de madera
- Bomba de mochila
- Rollo de alambre galvanizado
- Hoz
- Cuadrante metálico de 0.25 m²
- Cámara fotográfica

- Libreta de campo

Equipos de laboratorio

Los análisis de composición botánica y rendimiento de pastos, se realizaron en el Laboratorio de Análisis de Suelos, Plantas y Aguas de la EESC, el cual dispone de:

- Balanza de precisión (Shimadzu, modelo LIBROR AEG – 220).
- Estufa (Shell Lab).
- Estufa (LAB LINE).

Equipos de campo

Para el desarrollo del presente experimento se utilizaron los siguientes equipos:

- Dron DJI Mavic Pro, con una cámara MAPIR 3W RGNIR
- Dron DJI Phantom 4, con cámara multiespectral Parrot Sequoia
- Espectro radiómetro “Spectral Evolution” PSR-1100
- Penetrómetro digital Field Scout SC-900
- Barreno de torniquete

Equipos de computación

- Snap
- Drone Deploy
- QGIS
- InfoStat

Métodos

Se delimitó 12 parcelas experimentales en cada localidad con las siguientes dimensiones; 20 m de ancho por 20 m de largo siendo cada parcela de 400 m².

Las semillas fueron distribuidas uniformemente al voleo en forma manual en cada parcela (400 m²), finalmente se realizó el tapado de las semillas utilizando un rastrillo permitiendo que la semillas queden entre 1.5 - 2.0 cm del suelo para protegerlas del sol y de las lluvias abundantes.

Se realizaron fertilizaciones de fondo, desarrollo y mantenimiento del experimento de acuerdo a la recomendación que establece el Programa de Ganadería y Pastos de la Estación Experimental Santa Catalina (EESC). Las dosis que se aplicó fueron de 80 kg ha⁻¹ de N, 76 kg ha⁻¹ de P₂O₅, 12 kg ha⁻¹ de CaO, 7 kg ha⁻¹ de MgO y 11 kg ha⁻¹ de S. Para la siembra se aplicó por hectárea 3 sacos de 18-46-0; para el desarrollo 2 sacos de urea a los 45 días después de la siembra y para el mantenimiento 2 sacos de 15-15-15 cada dos cortes; un saco de sulfato de calcio, un saco de sulfato de magnesio y un saco de bórax cada seis meses.

Se realizó un corte de igualación aproximadamente a los 70 días después de la siembra con una moto guadaña dejando un residual de 5 cm, con el fin de que haya un rebrote vigoroso para el pastoreo y a la vez que se controle las malezas.

Se realizó el pastoreo directo entre los 30 a 35 días, en el estado fenológico completo del pasto para su nuevo aprovechamiento. Los indicativos fenológicos que muestran que las plantas están listas para ser aprovechadas son: para el rye grass perenne cuando tengan tres hojas por macollo y en el trébol blanco cuando empiecen a aparecer las primeras inflorescencias. En estos estados la composición de nutrientes es muy elevada y la digestibilidad es muy alta.

Humedad del suelo

Se evaluó la humedad del suelo, con un barrenado de torniquete a profundidades de 10, 20 y 30 cm en cada parcela en cuatro etapas de corte, antes y después de cada pastoreo. Las muestras se pesaron en una balanza de precisión marca Shimadzu. Después de pesar las muestras indicadas anteriormente se introdujeron a una estufa de secado marca LAB LINE a una temperatura de 105°C durante 24 horas hasta alcanzar un peso constante (peso seco) (Martin & Muñoz, 2010)

$$\%Hg = \frac{(PSH + PC) - (PSS + PC)}{(PSS + PC) - PC} \times 100$$

Dónde:

%Hg = Humedad gravimétrica porcentaje.

PSH = Peso del suelo húmedo.

PC = Peso de caja.

PSS = Peso del suelo seco.

Compactación del suelo

La compactación de suelo se determinó usando el equipo penetrómetro Field Scout SC-900 Digital que los resultados se expresan en PSI. El equipo consta de una púa de 45 cm terminada en un cono de 12.83 mm. El registro se realizó pulgada hasta las 9 pulgadas de profundidad, lo que nos permitió generar un perfil de compactación correspondiente a ese suelo. Los datos de las mediciones serán almacenados en el equipo. Se evaluó en cada tratamiento la resistencia a la compactación en cuatro etapas de corte, antes y después de realizar el corte o pastoreo (Ruiz et al., 2010)

Rendimiento

Se evaluó el rendimiento en cada parcela neta en cuatro etapas de corte, antes de cada pastoreo empleando un cuadrante metálico de 0.25 m² (0.50 m x 0.50 m) para registrar el peso promedio de rendimiento y estimarlo en kg de materia verde (MV) ha⁻¹ en cada aprovechamiento (Villafuerte et al., 1999)

$$PMS = \left(\frac{Ps}{Ph} \right) \times 100 \%$$

PMS = Porcentaje de materia seca.

Ps = Peso seco en gramos.

Ph = Peso húmedo en gramos.

Índice de Vegetación de Diferencia Normalizada (NDVI)

Según (Skykas, 2019) el NDVI se determinó a través de la siguiente fórmula:

$$NDVI = \frac{NIR - R}{NIR + R}$$

Donde:

NIR= banda del infrarrojo cercano.

R= banda roja.

Índice de Coloración (CI)

Se utilizó el CI, que reflejó en las curvas de la reflectancia el tipo de suelos presentes en el cultivo. El CI se determinará a través de la siguiente fórmula:

$$CI = \frac{R - G}{R + G}$$

Donde:

R= banda roja

G= banda verde

Índice de vegetación ajustada al suelo (SAVI)

El SAVI se determinó a través de la siguiente fórmula (Bahadur, 2018):

$$SAVI = \frac{NIR - R}{NIR + R + L} * (1 + L)$$

Dónde:

NIR = Banda de infrarrojo cercano.

R = Banda roja.

L = Puede tomar valores entre 0 y 1, dependiendo de la densidad de la vegetación.

Datos espectrales

La captura de datos espectrales en campo, se desarrolló con el uso de un espectro radiómetro “Spectral Evolution PSR-1100”, previo a la captura de datos se realizó una calibración por medio de un “Spectralon”, la colecta de datos se los realizó antes y después de cada corte o pastoreo en cada unidad experimental, se tomó 8 sub-muestras cubriendo en cada uno un área de 0,25 m² al azar, a una altura de 0.8 a 1 m sobre las proporciones forrajeras (Loza, 2016)

Imágenes espectrales

La toma de imágenes multiespectrales se realizó antes y después de cada corte o pastoreo en la parcela neta con el uso de los drones DJI Mavic PRO y DJI Phantom 4 con sus cámaras RGB Mapir 3W y Parrot Sequoia respectivamente, se calibró los sensores en función

de la radiación incidente al momento de la toma, se definió en traslapo de 70% entre cada imagen, la altura de vuelo será a 30 m, con las imágenes obtenidas se procederá al post procesamiento y generación de orto mosaicos multiespectrales, de este producto se obtendrán los índices de vegetación por procesamiento digital de imágenes (Cañarte & Mora, 2013).

Diseño experimental del proyecto

Se utilizaron 4 mezclas forrajeras que estuvieron constituidos por cuatro proporciones de trébol blanco (*Trifolium repens*) y rye grass perenne (*Lolium perenne*), representadas en porcentaje % (Tabla 4)

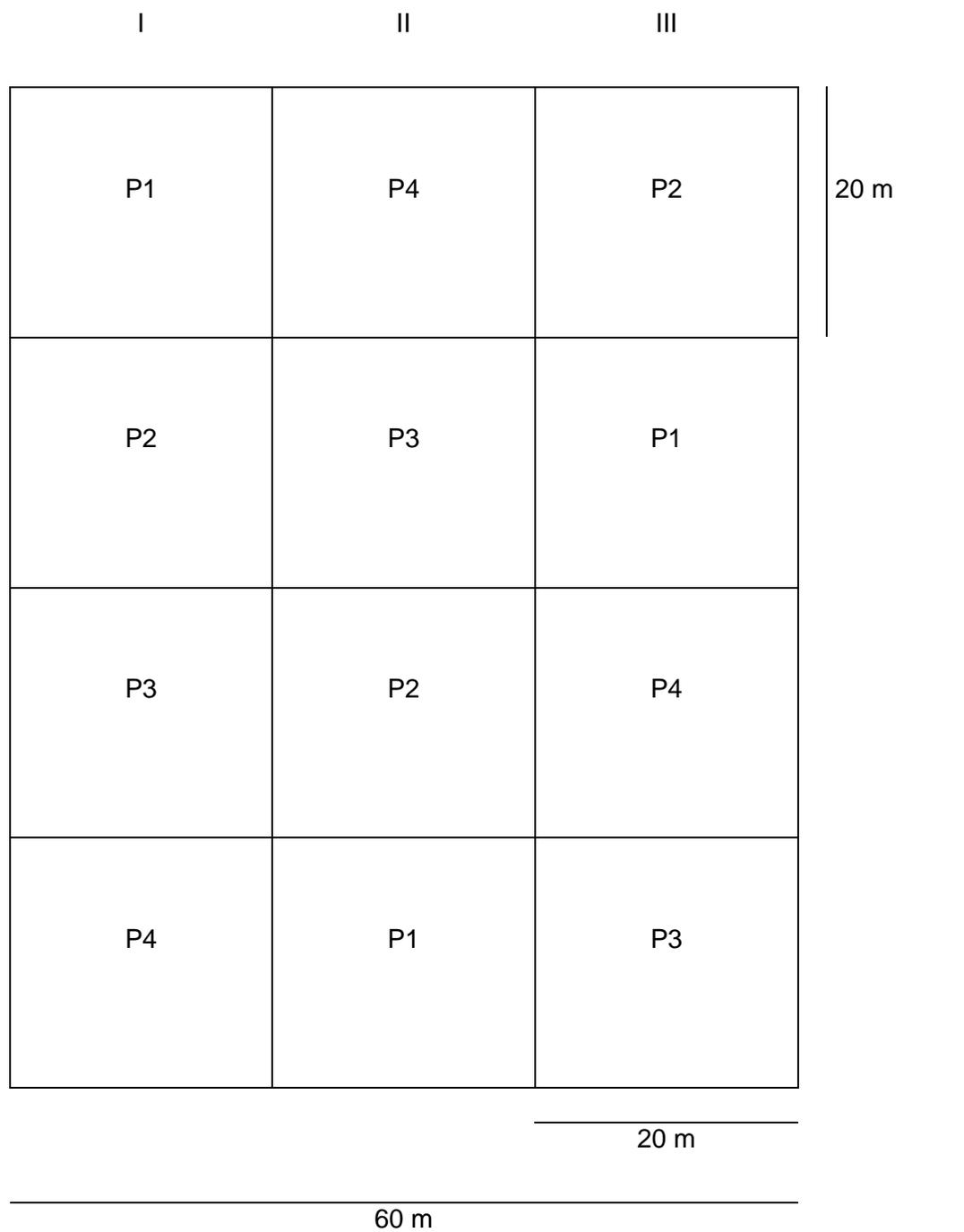
Tabla 4

Tratamientos en estudio

Tratamiento	Código	descripción
T1	P1	0% trébol blanco y 100% rye grass perenne
T2	P2	10% trébol blanco y 90% rye grass perenne
T3	P3	20% trébol blanco y 80% rye grass perenne
T4	P4	30% trébol blanco y 70% rye grass perenne

Nota. Descripción del tratamiento del experimento

Figura 2
Croquis experimental aplicado al ensayo



Nota. Croquis de la distribución de parcelas en la estación experimental

Características del campo experimental

La unidad experimental será una parcela de 20 m x 20 m (400 m²), conformada por cada proporción (leguminosa con gramínea), en esta unidad experimental se obtendrán los datos de humedad gravimétrica, compactación, rendimiento e índices de vegetación para el presente estudio.

Tabla 5

Características del campo experimental

Descripción	Unidad
Número de repeticiones	3
Número total de tratamientos	4
Unidades Experimentales	12
Área total de la parcela neta	361 m ²
Área total de la parcela	400 m ² (20 m x 20 m)
Área total del experimento	4800 m ²

Nota. Descripción por unidad del campo experimental en la estación

Análisis de varianza

Se realizó el siguiente análisis de la varianza (tabla 6).

Tabla 6

Esquema de análisis de varianza

Fuentes de variación	Grados de libertad
Total	11
Repeticiones	2
Tratamiento	3
Error experimental	6

Nota. Fuentes de varianza y grados de libertad para el experimento

Análisis funcional

El análisis estadístico se realizó con el software Infostat versión 2020 donde se verificó los supuestos de normalidad y homocedasticidad mediante las técnicas de inferenciales de Shapiro Wilks y Levene en el caso de variables con más de 50 datos se procedo a realizar la prueba de Kolmogorov para establecer si los datos son paramétricos. Se calculó el coeficiente de variación y se realizó la prueba de Tukey al 5% de significancia para establecer si existe una diferencia significativa en cuanto a los promedios (Blair & Taylor, 2008).

Correlación

Se realizó una correlación la misma que nos ayudó a ver la relación estadística entre dos variables, si la relación entre estos elementos no es lineal no se encontrara representada la correlación. Los valores que puede tomar la correlación van dados desde -1 a +1, a medida que aumenta el valor de la variable nos indica una mayor asociación entre estas variables. Con respecto a los índices de vegetación (NDVI, SAVI, CI) y las variables agro edafológicas (humedad, compactación del suelo, rendimiento), para esto se utilizó la fórmula de correlación de Pearson que se describe a continuación.

$$r_{xy} = \frac{\sum Z_x Z_y}{N}$$

Dónde:

X = Variable número uno.

Y = Pertenece a la variable número dos.

ZX = Desviación estándar de la variable uno.

ZY = Desviación estándar de la variable dos.

N = Numero de datos.

Análisis de regresión multivariable

Se realizó un análisis de regresión multivariable entre los índices de vegetación (variables independientes) y las variables agro edafológicas (variables dependientes). Para evaluar los modelos de regresión estimados se utilizaron los siguientes criterios: coeficiente de determinación, error cuadrático medio de predicción, Akaike. A continuación, se muestra la fórmula utilizada para este análisis estadístico.

$$Y = a + b_1x_1 + b_2x_2 + \dots + b_kx_k + error$$

Dónde:

Y = Valor pronosticado de la variable para un valor de X.

a = Intersección con Y. Es el valor estimado de Y cuando X = 0.

b = Pendiente de la recta o cambio promedio en Y, por unidad de cambio X.

X = Cualquier valor de x.

a, b = Coeficientes de regresión estimados.

Capítulo IV

Resultados y discusión

Resultados

En el presente trabajo se evaluaron características edafológicas (humedad gravimétrica del suelo y compactación del suelo), agronómicas (rendimiento) e índices de vegetación con la ayuda de sensores remotos de una mezcla forrajera compuesta de diferentes proporciones de Rye Grass perenne y trébol blanco, posteriormente con esos resultados, realizar una correlación y análisis de regresión multivariable con entre las variables agro edafológicas y los índices de vegetación, el estudio está ubicado en la Estación Experimental Santa Catalina del Instituto Nacional de Investigación Agropecuaria.

Humedad Gravimétrica.

A continuación (tabla 7) se realizó el análisis de varianza y los promedios de la variable humedad gravimétrica del suelo para cada tratamiento, repetición y corte, donde se muestra una diferencia significativamente alta para corte p-valor <0.001 del estudio por lo cual se realizó un análisis de Tukey (0.5) para comparar los promedios entre el tratamiento, corte y repeticiones y así encontrar si hay una diferencia estadística entre ellos.

Tabla 7

Análisis de varianza para humedad gravimétrica

F.V	SC	gL	CM	F	p-valor
Modelo	4051.98	10	405.20	91.87	<0.0001
Tratamiento	24.77	3	8.26	1.87	0.1438
Corte	4000.29	5	800.06	181.40	<0.0001
Repetición	26.93	2	13.46	3.05	0.0545
Error	269.03	61	4.41		
Total	4321.01	71			

Nota. Análisis de la varianza aceptable con un p-valor <0.0001 en el caso de modelo

Tabla 8*Prueba de Tukey al 5% para humedad gravimétrica para tratamiento*

Tratamiento	Medias	n	E.E	
4	41.60	18	0.49	A
1	40.93	18	0.49	A
3	40.68	18	0.49	A
2	39.96	18	0.49	A

Nota. Medias con una letra común no son significativamente diferentes ($p > 0.05$)

Tabla 9*Prueba de Tukey al 5% para humedad gravimétrica promedio de medias de corte*

Corte	Medias	n	E.E	
1	50.8	12	0.61	A
3	47.76	12	0.61	B
2	42.16	12	0.61	C
5	39.33	12	0.61	D
4	36.52	12	0.61	E
6	28.11	12	0.61	F

Nota. Medias con una letra común no son significativamente diferentes ($p > 0.05$)

Tabla 10*Prueba de Tukey al 5% para humedad gravimétrica en base de repeticiones*

Repeticiones	Medias	n	E.E	
2	41.42	24	0.43	A
1	41.00	24	0.43	A
3	39.96	24	0.43	A

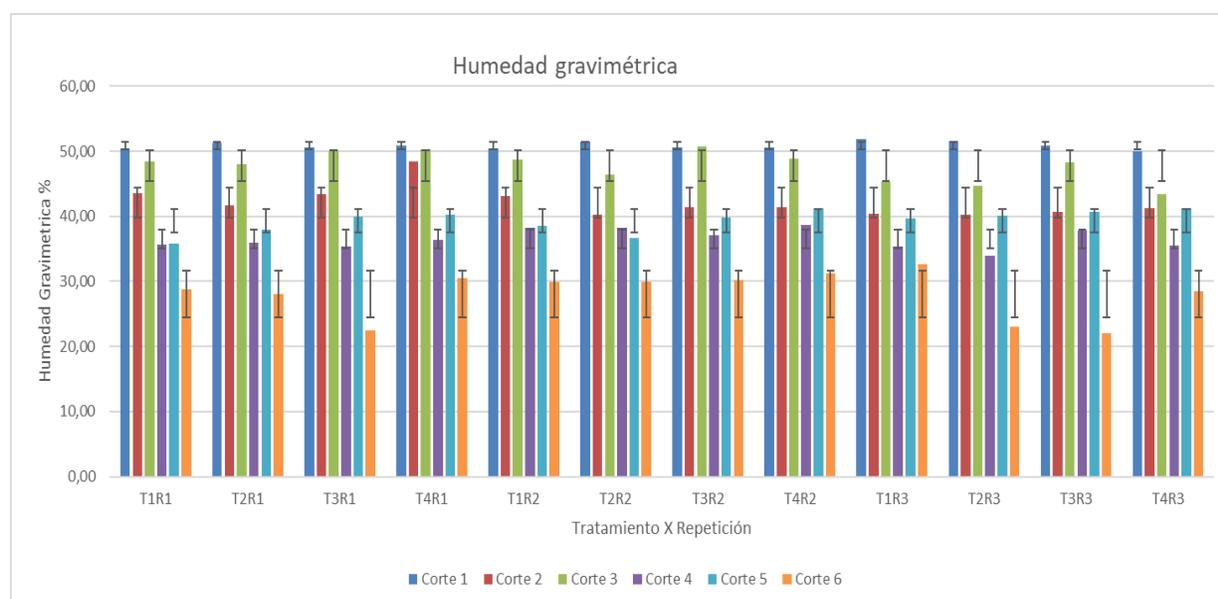
Nota. Medias con una letra común no son significativamente diferentes

La prueba de Tukey al 5% aplicado a los promedios de la media para el tratamiento, repeticiones y el corte nos muestra que, si hay una diferencia significativamente alta solo para

la variable corte, los cortes 1, 3 y 5 que corresponde a la humedad presente en el suelo antes de que entre el ganado al pastorea es significativamente más alta a los cortes 2, 4 y 6 que correspondes a la humedad presente en el suelo después que el ganado ya se alimentó de las pasturas.

Figura 3

Grafica de humedad gravimétrica por tratamiento y repetición vs corte



Nota. Se puede observar en la gráfica de barras que si hay una diferencia significativa entre corte mostrando que en el corte 6 correspondiente a después del pastoreo la cantidad de humedad presente en el suelo baja de manera significativa en comparación al corte 1.

Compactación del suelo

En la siguiente tabla se observará el análisis de varianza aplicado a la compactación de suelo, se observa si existen diferencias altamente significativas para el corte con un p-valor de < 0.001, en los cortes 1, 2, 3, 4, 5, 6.

Tabla 11*Análisis de varianza para compactación del suelo*

F.V	SC	gL	CM	F	p-valor
Modelo	317061.62	10	31706.16	55.23	<0.0001
Tratamiento	555.93	3	185.31	0.32	0.8089
Repetición	394.93	2	197.47	0.34	0.7103
Corte	316110.76	5	63222.15	110.12	<0.0001
Error	35020.09	61	574.10		
Total	352081.71	71			

Nota. Análisis de la varianza aceptable con un p-valor <0.0001 en el caso de modelo

Tabla 12*Prueba de Tukey al 5% para compactación en base de tratamientos*

Tratamiento	Medias	n	E.E	
3	94.38	18	5.65	A
2	91.54	18	5.65	A
4	90.93	18	5.65	A
1	86.61	18	5.65	A

Nota. Medias con una letra común no son significativamente diferentes ($p > 0.05$)

Tabla 13*Prueba de Tukey al 5% para humedad gravimétrica en base de corte*

Corte	Medias	N	E.E	
6	193.81	12	6.92	A
5	155.71	12	6.92	B
4	99.49	12	6.92	C
2	59.06	12	6.92	D
3	19.11	12	6.92	E
1	18.02	12	6.92	E

Nota. Medias con una letra común no son significativamente diferentes ($p > 0.05$)

Tabla 14
Prueba de Tukey al 5% para humedad gravimétrica para repeticiones

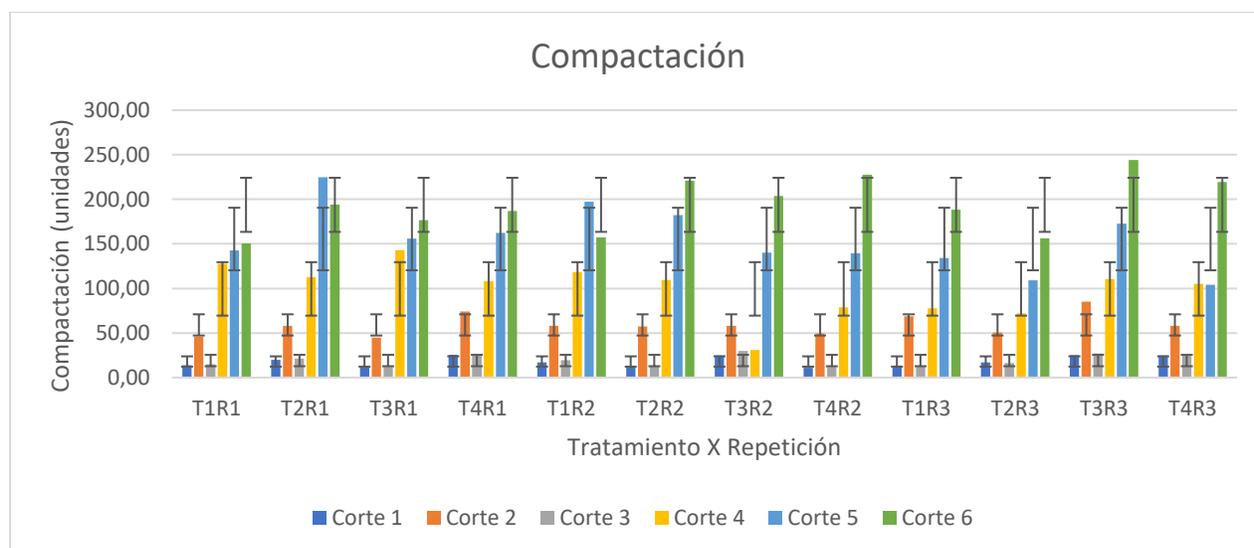
Repeticiones	Medias	n	E.E	
1	93.93	24	4.89	A
2	90.42	24	4.89	A
3	88.25	24	4.89	A

Nota. Medias con una letra común no son significativamente diferentes ($p > 0.05$)

En la tabla 13 correspondiente a la prueba de Tukey al 5% aplicada al corte se observa una diferencia significativamente alta para las medias de la compactación en el suelo que va en orden de ascendente a descendente observando que en el corte 6 correspondiente al tercer corte después del pastoreo presenta una media más alta en comparación a los demás cortes igual se observa una diferencia entre el corte 2 correspondiente al primer corte después del pastoreo y el corte 3 correspondiente al segundo corte antes del pastoreo mismo que tiene una media de compactación más baja en comparación al corte 2.

Figura 4

Grafica de barras de la compactación del suelo tratamiento y repetición vs corte



Nota. Se observa que, si hay diferencia significativa entre los cortes, se puede ver en el gráfico de barras como la compactación del suelo va aumentando gradualmente por cada corte

Rendimiento de pasturas

En la tabla se realizó un análisis de varianza para el rendimiento de pasturas en cuestión de tratamiento, corte y repeticiones, para la variable rendimiento solo se tomó 9 muestras por cada tratamiento antes del pastoreo por lo cual solo habrá 3 cortes. Se encontró diferencias significativamente altas para el corte p-valor <0.001 mientras que en tratamiento y repetición no se encontraron diferencias significativas.

Tabla 15

Análisis de varianza para rendimiento de las pasturas

F.V	SC	gL	CM	F	p-valor
Modelo	2678.96	7	382.71	22.32	<0.001
Tratamiento	64.80	3	21.60	1.26	0.2923
Repetición	41.74	2	20.87	1.22	0.3004
Corte	2572.42	2	1286.21	75.02	<0.0001
Error	1714.48	100	17.14		
Total	4393.44	107			

Nota. Análisis de la varianza aceptable con un p-valor <0.0001 en el caso de modelo

Tabla 16

Prueba de Tukey al 5% para rendimiento de pasturas para tratamiento

Tratamiento	Medias	n	E.E	
4	26.76	27	0.80	A
3	25.90	27	0.80	A
1	15.60	27	0.80	A
2	24.59	27	0.80	A

Nota. Medias con una letra común no son significativamente diferentes ($p > 0.05$)

Tabla 17

Prueba de Tukey al 5% para rendimiento de pasturas para corte

Corte	Medias	n	E.E	
1	30.99	36	0.60	A
3	26.93	36	0.69	B
2	19.22	36	0.69	C

Nota. Medias con una letra común no son significativamente diferentes ($p > 0.05$)

Tabla 18

Prueba de Tukey al 5% para rendimiento de pasturas para repeticiones

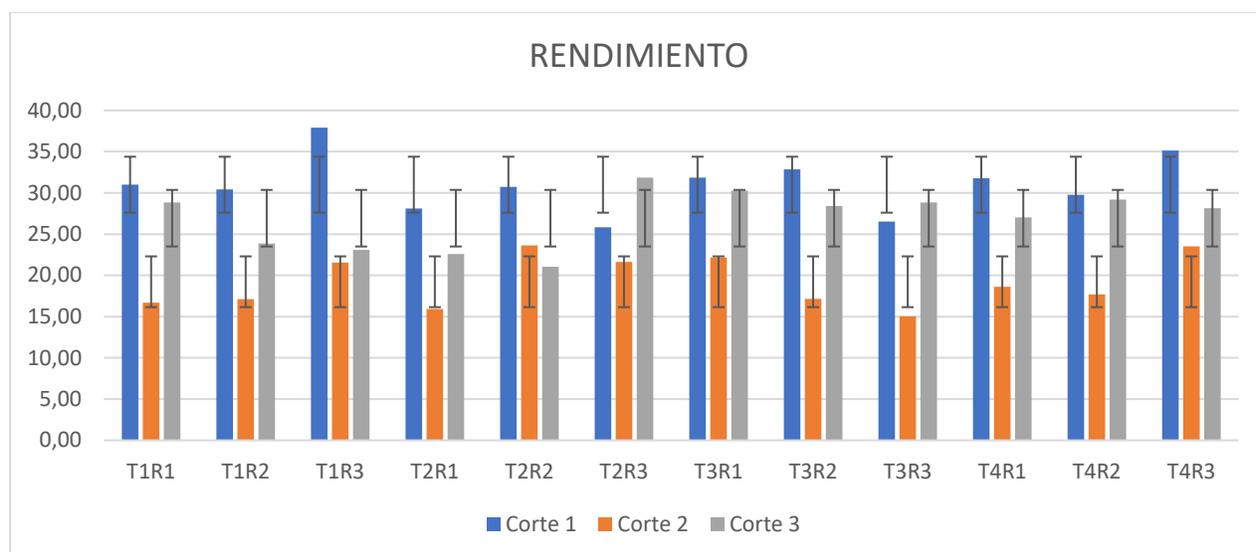
Repeticiones	Medias	n	E.E	
3	26.58	36	0.69	A
1	25.40	36	0.69	A
2	25.16	36	0.69	A

Nota. Medias con una letra común no son significativamente diferentes ($p > 0.05$)

En la prueba de Tukey al 5% aplicada para los tratamientos, corte y repeticiones se puede observar en la tabla 17 que es la única que presenta diferencias significativamente altas ordenado de forma descendente podemos ver que en el primer corte se obtiene un rendimiento de pasturas más alto con una media de 30.99 seguido por el tercer corte con una media de 26.93 y el segundo corte con el menor rendimiento teniendo una media de 19.22. Los datos de rendimiento se tomaron y transformaron a toneladas por hectárea para su mejor comprensión.

Figura 5

Grafica de barras del rendimiento de pasturas tratamiento y repetición vs corte



Nota. En la figura 9 se puede observar como el corte 1 y 3 en todos los tratamientos y repeticiones se presentan más altos que el corte 2

Normalized Difference Vegetation Index (NDVI)

Del análisis de varianza para el índice NDVI como se presenta en la siguiente tabla, se observa que existe diferencias significativamente altas para tratamiento (p -valor <0.0001) así como para corte (p -valor <0.0001).

Tabla 19

Análisis de la varianza NDVI

F.V.	SC	gl	CM	F	p-valor
Modelo	0.27	8	0.003	75.48	<0.0001
Tratamiento	0.005	3	0.02	37.43	<0.0001
Corte	0.22	5	0.04	98.32	<0.0001
Error	0.001	15	4.5E-04		
Total	0.28	23			

Nota. Análisis de la varianza aceptable por p -valor en el caso de modelo

Tabla 20*Prueba Tukey 5% para NDVI promedio entre tratamientos*

Tratamiento	Medias	N	E.E	
4	0.86	6	0.01	A
1	0.76	6	0.01	B
2	0.76	6	0.01	B
3	0.74	6	0.01	B

Nota. Medias con una letra común no son significativamente diferentes ($p > 0.05$)

Tabla 21*Prueba Tukey 5% para NDVI promedio entre cortes*

Cortes	Medias	N	E.E	
5	0.90	4	0.01	A
3	0.87	4	0.01	A
1	0.80	4	0.01	B
4	0.79	4	0.01	B
6	0.67	4	0.01	C
2	0.63	4	0.01	C

Nota. Medias con una letra común no son significativamente diferentes ($p > 0.05$)

Se realizó una prueba de comparación para la variable NDVI obteniendo las tablas 21 y 22. Se observa de acuerdo a la tabla 21 que solo hay una diferencia significativa para el tratamiento 4, que esté compuesto por 30% trébol blanco y 70% Rye Grass perenne. Mientras que para el corte podemos observar en la tabla 22 que hay diferencia significativa entre los cortes 1, 3 y 5 que corresponde a antes del pastoreo con medias más altas que los cortes 2, 4 y 6 que corresponden a después del pastoreo, cabe mencionar que el índice NDVI se encuentra valores entre -1 y 1 siendo los valores más altos quienes se relacionan con el vigor de la planta.

Soil Adjusted Vegetation Index (SAVI)

Del análisis de la varianza para el índice SAVI como se presenta en la tabla 23 se observa que existen diferencias altamente significativas para el corte p-valor <0.001 lo que se podrá ver en la tabla 22

Tabla 22

Análisis de la varianza SAVI

F.V.	SC	GI	CM	F	p-valor
Modelo	0.63	8	008	168.67	<0.001
Tratamiento	4.1E-03	3	4E-03	2.93	0.0680
Corte	0.63	5	0.13	268.12	<0.0001
Error	0.01	15	4.7E-04		
Total	0.64	23			

Nota. Análisis de la varianza aceptable con un p-valor en el caso de modelo

Tabla 23

Prueba Tukey 5% para SAVI promedio entre tratamientos

Tratamiento	Medias	N	E.E	
1	1.13	6	0.01	A
2	1.12	6	0.01	A
4	1.11	6	0.01	A
3	1.09	6	0.01	A

Nota. Medias con una letra común no son significativamente diferentes ($p > 0.05$)

Tabla 24*Prueba Tukey 5% para SAVI promedio entre corte*

Corte	Medias	n	E.E	
5	1.32	4	0.01	A
3	1.26	4	0.01	B
1	1.15	4	0.01	C
4	1.14	4	0.01	C
6	0.93	4	0.01	D
2	0.88	4	0.01	E

Nota. Medias con una letra común no son significativamente diferentes ($p > 0.05$)

Como se puede ver en la tabla 24 hay una diferencia altamente significativa para los cortes al igual que en el índice NDVI la mayor diferencia está entre los cortes 1,3 y 5 que corresponden a los antes del pastoreo y a los cortes 2,4 y 6 que corresponden a después del corte. El índice SAVI es un índice donde que consta de un parámetro L que permite corregir el problema de la influencia del suelo ofrecida por el índice NDVI.

Lo que estos índices de vegetación tanto el SAVI como el NDVI nos muestran es como tras realizado el pastoreo el vigor de las plantas baja, de igual manera estos índices se encuentran ligados al desarrollo fenológico de las plantas como se observa en el quinto corte el pasto se encuentra en su máximo desarrollo lo que se evidencia con medias más altas tanto para el índice NDVI como para el SAVI.

Coloration Index (CI)

Del análisis de varianza para el índice de vegetación CI como se presenta en la tabla 25 se observa que existen diferencias significativamente altas para el corte con un p-valor < 0.0001 mientras que el tratamiento no mostro diferencia significativa manteniéndose con un p-valor 0.368.

Tabla 25*Análisis de la varianza CI*

F.V.	SC	GI	CM	F	p-valor
Modelo	0.17	8	0.02	81.06	<0.001
Tratamiento	8.9E-04	3	3.0E-04	1.15	0.3608
Corte	0.17	5	0.03	129.01	<0.0001
Error	3.9E-03	15	2.6E-04		
Total	0.17	23			

Nota. Análisis de la varianza aceptable con un p-valor en el caso de modelo

Tabla 26*Prueba Tukey 5% para CI promedio entre tratamientos*

Tratamiento	Medias	n	E.E	
3	-0.008	6	0.01	A
1	-0.10	6	0.01	A
4	-0.10	6	0.01	A
2	-0.10	6	0.01	A

Nota. Medias con una letra común no son significativamente diferentes ($p > 0.05$)

Tabla 27*Prueba Tukey 5% para CI promedio entre cortes*

Tratamiento	Medias	n	E.E	
6	0.06	4	0.01	A
2	-0.03	4	0.01	B
4	-0.12	4	0.01	C
1	-0.13	4	0.01	C
3	-0.17	4	0.01	D
5	-0.18	4	0.01	D

Nota. Medias con una letra común no son significativamente diferentes ($p > 0.05$)

En la prueba de comparación de Tukey al 5 % se puede observar que solo existe diferencias altamente significativas para el valor de índice de coloración en los cortes, a diferencia de los otros índices en este índice se observa que las medias más altas corresponden a los cortes 2, 4 y 6 que equivalen a después del pastoreo, según Ouerchefani et al., 2009 valores altos de CI corresponde a suelos costrosos y áridos, se puede ver que mientras más pasa el pastoreo esto afecta al suelo volviéndolo más costroso por el pisoteo animal.

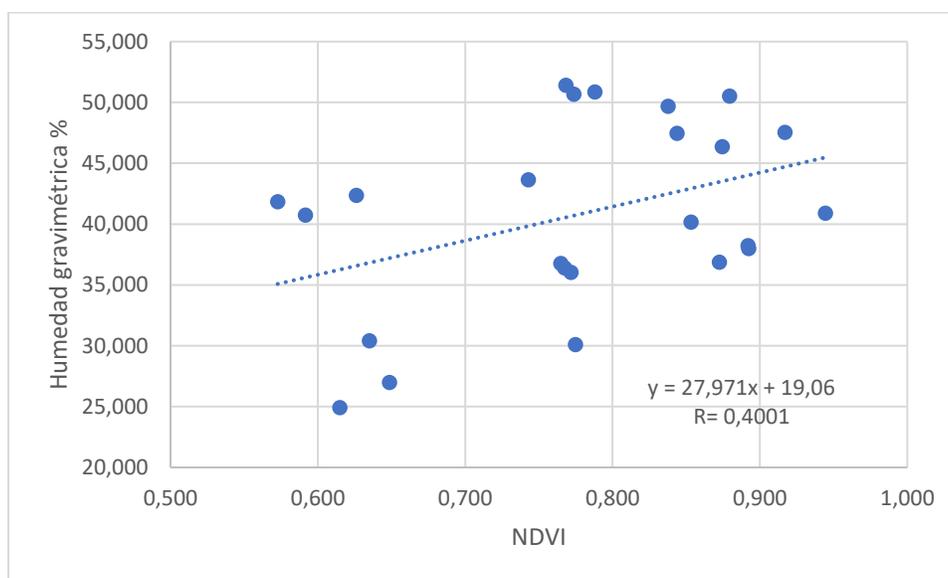
Correlaciones

En las siguientes tablas se realizó la correlación de las variables agro edafológicas (humedad gravimétrica, compactación y rendimiento) con los índices de vegetación (NDVI, SAVI, CI).

Humedad gravimétrica.

Figura 6

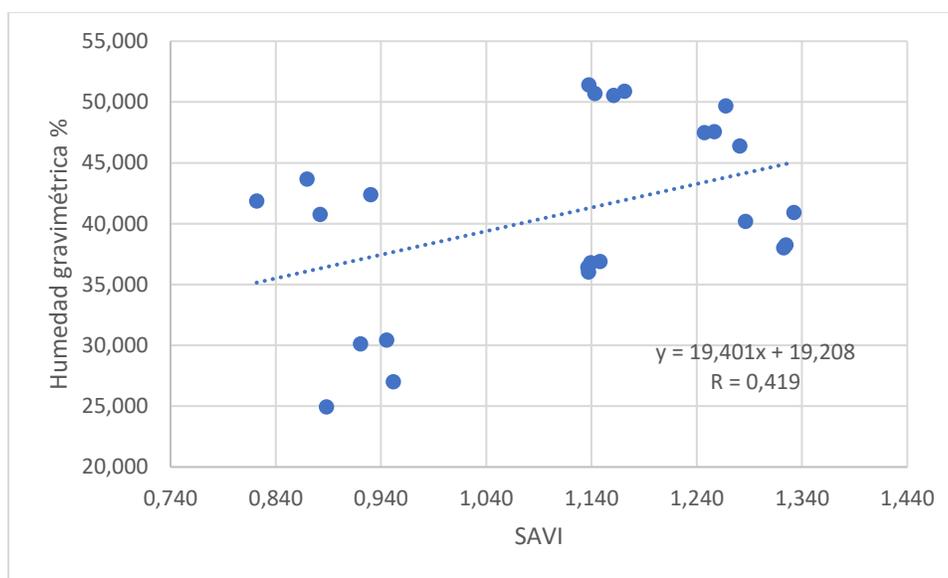
Correlación de Pearson entre la humedad gravimétrica y NDVI



Nota. Con la correlación de Pearson se logró calcular si hay correlación alta, baja, negativa o positiva

Figura 7

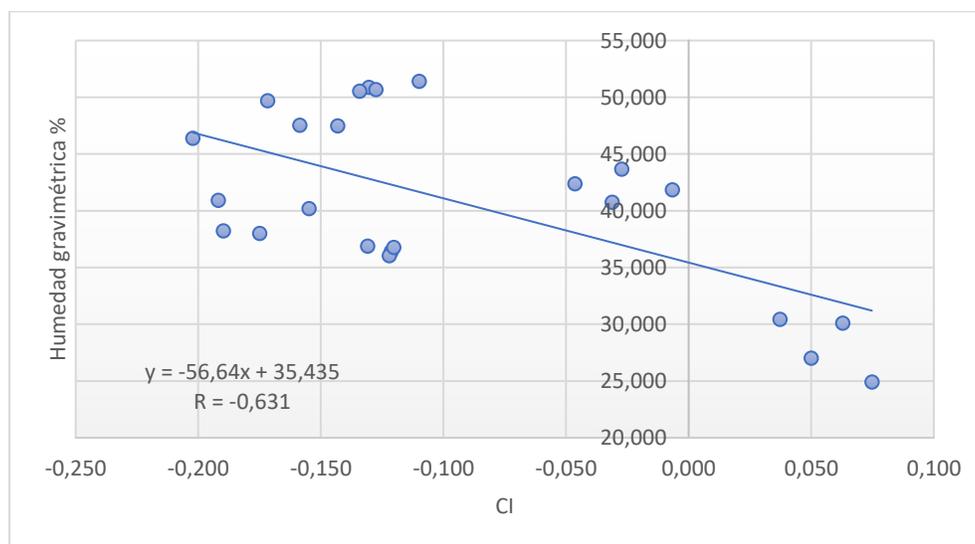
Correlación de Pearson entre la humedad gravimétrica y SAVI



Nota. Con la correlación de Pearson se logró calcular si hay correlación alta, baja, negativa o positiva

Figura 8

Correlación de Pearson entre la humedad gravimétrica y CI



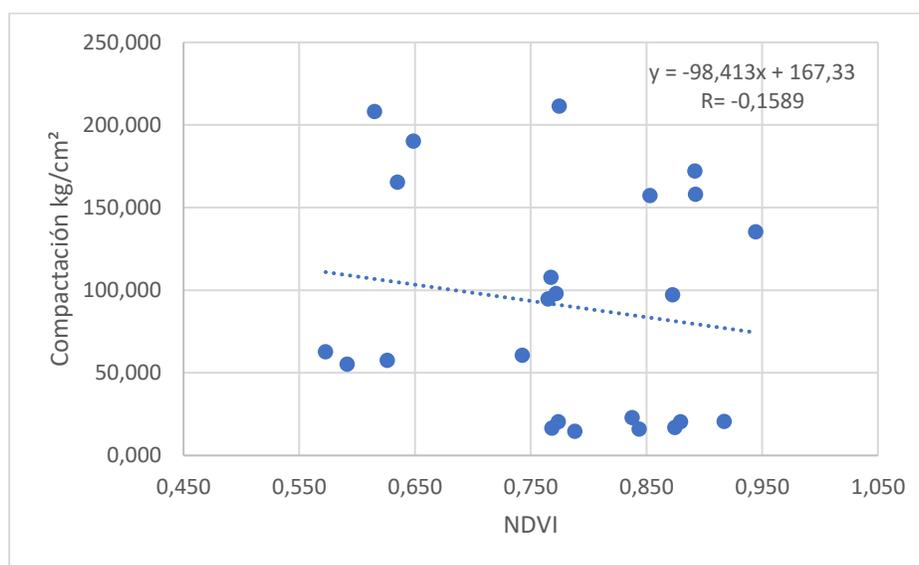
Nota. Con la correlación de Pearson se logró calcular si hay correlación alta, baja, negativa o positiva

En la figura 7 y 8 correspondiente a la correlación entre humedad gravimétrica en índices de vegetación NDVI y SAVI respectivamente se puede observar que es una correlación positiva débil con el r para NDVI de 0,4001 y para SAVI de 0,419. Mientras que para el índice de vegetación CI se obtuvo una correlación negativa alta con un r de -0,631 lo cual nos indicó que el tanto la humedad gravimétrica como el índice CI con el paso de los cortes bajan.

Compactación del suelo.

Figura 9

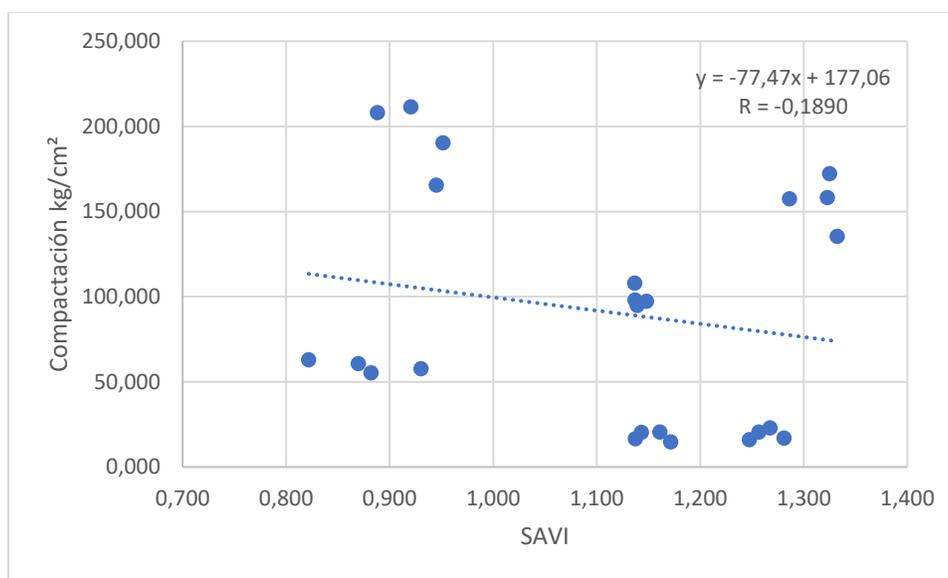
Correlación de Pearson entre la compactación del suelo y NDVI



Nota. Con la correlación de Pearson se logró calcular si hay correlación alta, baja, negativa o positiva

Figura 10

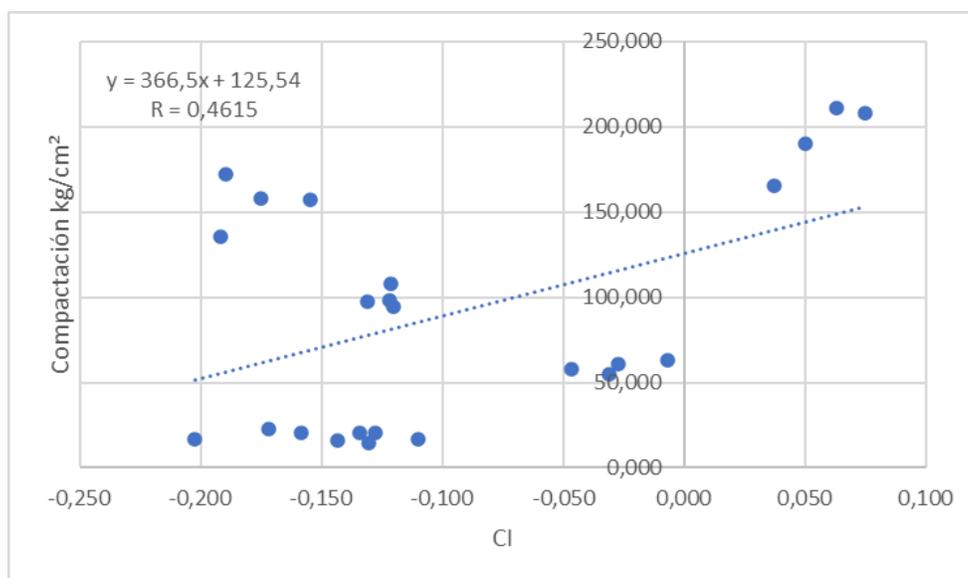
Correlación de Pearson entre la compactación del suelo y SAVI



Nota. Con la correlación de Pearson se logró calcular si hay correlación alta, baja, negativa o positiva

Figura 11

Correlación de Pearson entre la compactación del suelo y CI



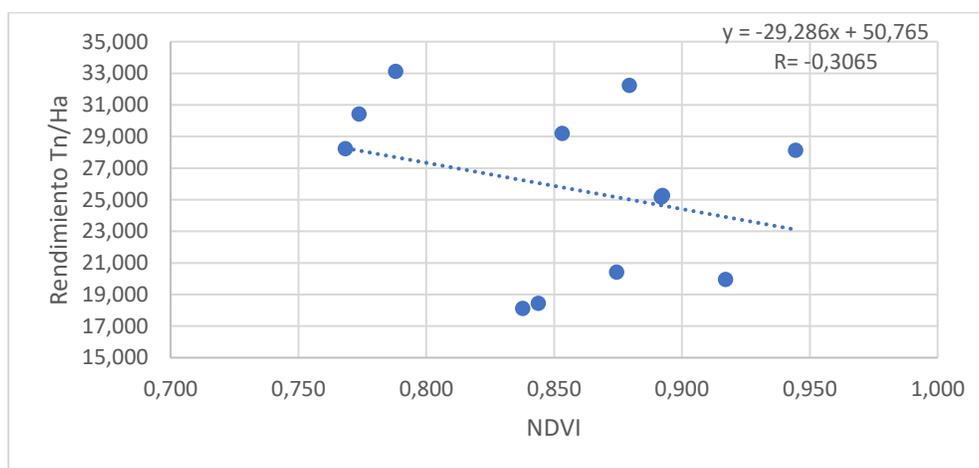
Nota. Con la correlación de Pearson se logró calcular si hay correlación alta, baja, negativa o positiva

En la figura 10 y 11 correspondiente a la correlación de Pearson entre la compactación del suelo y los índices de vegetación NDVI Y SAVI se observa que presentan valores de r para NDVI de -0.1589 y para SAVI de -0.1890 lo que nos indica que la correlación entre estas variables es negativa débil. Para la correlación entre la compactación del suelo y el índice de vegetación CI él se presentó una correlación positiva débil con un R=0.1615.

Rendimiento de pasturas

Figura 12

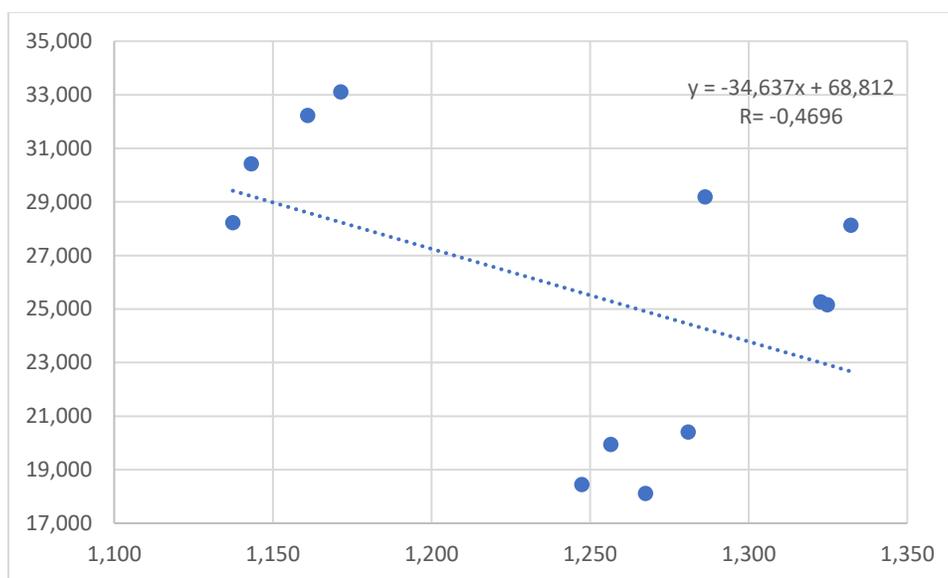
Correlación de Pearson entre rendimiento de pasturas y el NDVI



Nota. Con la correlación de Pearson se logró calcular si hay correlación alta, baja, negativa o positiva

Figura 13

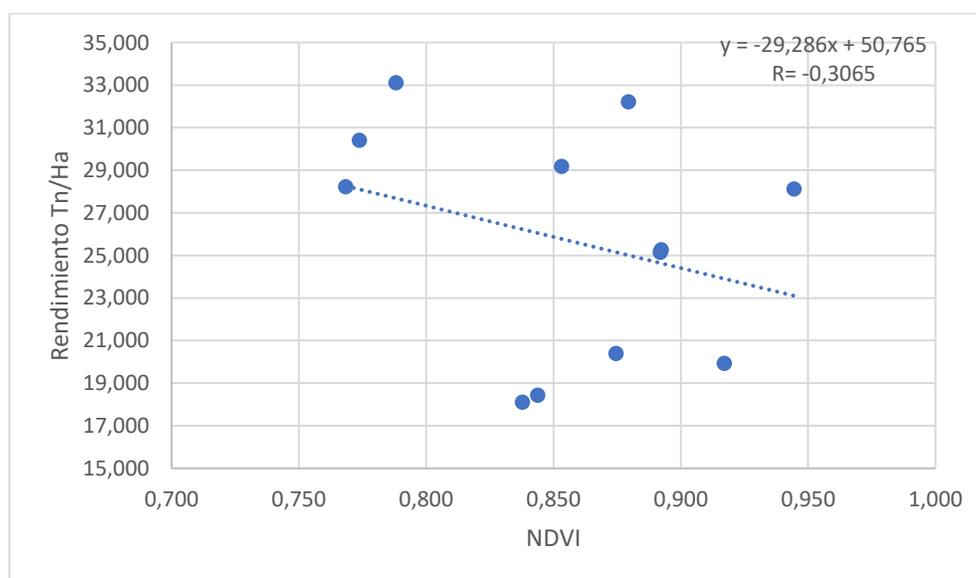
Correlación de Pearson entre rendimiento de pasturas y el SAVI



Nota. Con la correlación de Pearson se logró calcular si hay correlación alta, baja, negativa o positiva

Figura 14

Correlación de Pearson entre rendimiento de pasturas y el CI



Nota. Con la correlación de Pearson se logró calcular si hay correlación alta, baja, negativa o positiva

En el análisis de las correlaciones de Pearson entre el rendimiento de pasturas y los índices de vegetación NDVI, CI y SAVI se puede observar que con los tres índices de vegetación la variable agronómica presenta una correlación negativa débil es decir estas variables se relacionan inversamente entre sí.

Análisis de regresión múltiple

Para el análisis de regresión multivariable se tomó a los índices de vegetación como las variables regresoras o independientes y al rendimiento, humedad gravimétrica y compactación como las variables dependientes para cada caso, lo que nos permitió establecer una fórmula capaz de calcular estas variables agro edafológicas, solo con la ayuda de los índices de vegetación. Para que la formula sea más exacta en el caso de la humedad gravimétrica y la compactación se aumentó el tamaño muestra de a $n=3$ y para el rendimiento a $n=6$ esto con la ayuda del programa estadístico Infostat.

Para la validación del modelo estadístico que obtengamos de igual forma se utilizó el programa Infostat para realizar un análisis de varianza de ese modelo y verificar que el p-valor sea menor que 0,05 lo cual nos indica que el modelo desarrollado es confiable.

Humedad gravimétrica

Tabla 28

Coefficientes de regresión y estadísticos asociados

Coef	Est	E.E	LI	LS	T	P-valor	CpMallows
Const	48.88	1.25	46.42	51.33	39.06	<0.0001	
CI	-132.41	3.26	-138.79	-126.02	-40.67	<0.0001	1656.43
SAVI^2	-21.60	0.98	-23.52	-19.68	-22.04	<0.0001	487.72
NDVI	8.10	2.35	3.49	12.72	3.45	0.0006	13.87

Nota. Error cuadrático medio: 7.882

Tabla 29*Análisis de la varianza para comprobar el modelo*

F.V.	SC	gl	CM	F	p-valor
Modelo	19248.40	3	6416.13	812.52	<0.0001
NDVI	98.19	1	98.19	12.44	0.0004
CI	12968.71	1	12968.71	1642.32	<0.0001
SAVI	3799.67	1	3799.67	481.18	<0.0001
Error	15951.04	2020	7.90		
Total	35199.45	2023			

Nota. Con el presente ANOVA se acepta la fórmula de análisis de regresión múltiple

En la tabla 29 se puede comprobar que el p-valor de (<0.0001) es menor que 0.005 lo cual indica que este modelo predictivo es confiable, con los valores de coeficientes de regresión presentes en la tabla 28 se puede establecer la fórmula que nos ayudará a calcular la humedad gravimétrica promedio de 0 a 30 cm de profundidad presentes en el suelo, esta será:

$$\text{Humedad gravimétrica} = 48.88 - 132.41 \text{ CI} - 21.60 \text{ SAVI}^2 + 8.10 \text{ NDVI} + 7.882$$

Compactación del suelo

Tabla 30*Coefficientes de regresión y estadísticos asociados*

Coef	Est	E.E	LI	LS	T	P-valor	CpMallows
Const	-99.09	6.08	-111.02	-87.16	-16.29	<.0001	
CI	1367.23	29.14	1310.09	1424.37	46.93	<0.0001	2203.17
SAVI^2	256.33	6.79	243.01	269.65	37.74	<0.0001	1425.06

Nota. Error cuadrático medio: 631.5215

Tabla 31*Análisis de la varianza para comprobar el modelo*

F.V.	SC	gl	CM	F	p-valor
Modelo	1487133.71	4	371783.43	589.15	<0.0001
NDVI	1827.29	1	1827.29	2170.00	0.0890
CI	1369370.69	1	1369370.69	2170.0	<0.0001
SAVI	502587.23	2	251293.61	389.22	<0.0001
Error	1274082.78	2019	631.05		
Total	2761216.49	2023			

Nota. Con el presente ANOVA se acepta la fórmula de análisis de regresión múltiple

En la tabla 30 podemos observar los coeficientes con los que se va a trabajar en el modelo, en este modelo predictivo para la compactación no se usara el índice espectral NDVI ya que como se ve en la tabla 31 el p-valor del NDVI es mayor que 0.05 lo que nos muestra que no afecta al modelo predictivo y aplicando el método de selección de modelo “stepwise” con una máxima p-valor para entrar de 0.05 y un máximo p-valor para retener en el modelo de 0.05 se eliminó este coeficiente del modelo predictivo de la compactación del suelo, para calcular la compactación del suelo en Kg/cm² promedio de 0 a 30 cm de profundidad es la siguiente:

$$\text{Compactación del suelo} = -99.09 + 1367.23CI + 256.33SAVI^2 + 631.52$$

Rendimiento

Tabla 32*Coefficientes de regresión y estadísticos asociados.*

Coef	Est	E.E	LI	LS	T	P-valor	CpMallows
Const	54.35	3.74	47.01	61.69	14.53	<.0001	
SAVI	-27.59	4.32	-36.07	-19.12	-6.39	<0.0001	42.80
CI	44.24	9.05	26.47	62.01	4.89	<0.0001	25.88
NDVI	14.81	4.19	6.58	23.04	3.53	0.0004	14.48

Nota. Error cuadrático medio: 1.806

Tabla 33*Análisis de la varianza para comprobar el modelo*

F.V.	SC	gl	CM	F	p-valor
Modelo	549.72	3	183.24	101.45	<0.0001
NDVI	22.54	1	22.54	12.48	0.0004
SAVI	73.69	1	73.69	40.80	<0.0001
CI	43.14	1	43.14	23.88	<0.0001
Error	1661.79	920	1.81		
Total	2211.51	923			

Nota. Con el presente ANOVA se acepta la fórmula de análisis de regresión múltiple

En la tabla 33 se puede observar que el p-valor es menor a 0.05 lo cual indica que es un modelo confiable. En la tabla 32 se puede observar por el CpMallows que el índice de vegetación que más influye en el modelo es SAVI lo cual se puede corroborar con la literatura ya que este índice ayuda a identificar la distribución y el tipo de vegetación del área sin la influencia del suelo. La ecuación quedaría:

$$\text{Rendimiento} \frac{Tn}{ha} = 54.35 - 27.59SAVI + 44.24CI + 14.81NDVI + 1.806$$

Capítulo V

Conclusiones y recomendaciones

Conclusiones

- Con el análisis de varianza realizado a las variables agro edafológicas se determinó el comportamiento de estas a lo largo del tiempo, en el caso de la humedad gravimétrica compactación y rendimiento se observó cambios estadísticamente significativos para los cortes, siendo los cortes 1, 3 y 5 los que presentaron mejor respuesta a comparación con los cortes 2, 4 y 6, lo que indica que posterior al paso del ganado no solo las variables edafológicas se ven afectadas sino también las variables agrícolas.
- En el caso de los índices de vegetación nos permitió corroborar la anterior conclusión mencionada, ya que se observa diferencia estadísticamente significativa solo para la variable corte, presentando valores bajos para los cortes 2, 4 y 6 en comparación a los cortes 1, 3 y 5, en el caso del índice de coloración fue lo contrario se observaron valores altos para los cortes 2, 4 y 6 lo que según la literatura nos indica que después del paso del ganado para su alimentación los suelos se afectan perdiendo humedad, compactándose y bajando el rendimiento de las pasturas.
- La correlación existente entre las variables agro edafológicas y los índices de vegetación, para el caso de la humedad gravimétrica tuvo una correlación positiva débil con los índices de vegetación NDVI y SAVI por otro lado con el índice de vegetación CI presento una correlación negativa alta lo cual indica que con el paso del tiempo y el pastoreo tanto el CI como la humedad gravimétrica van bajando. Para la compactación de igual manera se encontró una correlación negativa débil con los índices de vegetación NDVI y SAVI, a diferencia del índice de vegetación CI el cual presento una correlación positiva débil. El rendimiento mostro una correlación negativa débil con los

tres índices de vegetación analizados lo cual nos indica que mientras pasa el tiempo de pastoreo los índices de vegetación bajan al igual que el rendimiento de esos pastos.

- Se logro obtener tres modelos predictivos para determinar la humedad gravimétrica promedio a una profundidad de 0 a 30 cm usando los índices de vegetación CI, SAVI² Y NDVI de los cuales, el CI al igual que en la correlación presento una mayor importancia en el modelo. En el caso de la compactación se estableció el modelo predictivo para calcular la compactación del suelo de 0 a 30 cm de profundidad en Kg/cm² solo usando dos de los tres índices de vegetación los cuales fueron CI y SAVI² al igual que la humedad se encuentra una gran influencia en el modelo por parte del índice de vegetación CI. Para calcular el rendimiento en Tn/ha con el modelo predictivo se usó los tres índices de vegetación en este caso el que mayor influencia tuvo sobre el modelo fue el índice SAVI ya que nos permite ver el estado del cultivo sin la influencia del suelo.

Recomendaciones

- Realizar un estudio para obtener modelos predictivos usando más índices de vegetación para poder determinar un modelo con mayor exactitud.
- Utilizar el estudio en diferentes pisos climáticos para determinar si existe relación entre los índices de vegetación y las variables agro edafológicas con la altura con la que se trabaja.
- Incluir otras variables como fertilización, dotación de agua para que el modelo de regresión sea más preciso.
- Probar realizando un modelo predictivo entre diferentes índices de vegetación con la calidad forrajera para así poder determinar esta sin necesidad de estar en campo.
- Comprobar si los modelos predictivos sirven para otras mezclas forrajera o diferentes proporciones que las que se estudió en esta investigación.

Bibliografía

- Avila, O. (2019). *Efecto de la labranza convencional y siembra directa en las propiedades químicas de un suelo sembrado con maíz y fréjol*.
<http://www.dspace.uce.edu.ec/handle/25000/19032>
- Bahadur. (2018). NDVI, NDBI & NDWI Calculation Using Landsat 7,8. In *Https://Www.Linkedin.Com/* (Issue September 2018, p. 8).
<https://www.linkedin.com/pulse/ndvi-ndbi-ndwi-calculation-using-landsat-7-8-tek-bahadur-kshetri/%0Ahttps://www.linkedin.com/pulse/ndvi-ndbi-ndwi-calculation-using-landsat-7-8-tek-bahadur-kshetri>
- Bárcena, C., & Cozzi, M. (2016). *Efecto del pastoreo de diferido de maíz sobre características físicas del suelo en lotes de siembra directa*.
- Blair, C., & Taylor, R. (2008). *Bioestadística*. Pearson.
- Blanco-Sepúlveda, R. (2009). La relación entre la densidad aparente y la resistencia mecánica como indicadores de la compactación del suelo. *Agrociencia*, 43(3), 231–239.
- Cañarte, D., & Mora, M. (2013). *RELACIÓN DE LA VARIACIÓN ESPECTRAL MEDIANTE ÍNDICES DE VEGETACIÓN EN QUINUA (Chenopodium quinoa) EN UN ENSAYO CONTROLADO Y UN CULTIVO COMERCIAL*.
- Castro-Popoca, M., Águila, M., Quevedo, A., Kleisinger, S., Tijerina, L., & Mejía, E. (2008). Sistema de riego automatizado en tiempo real con balance hídrico, medición de humedad del suelo y lisímetro. *Agricultura Técnica En México*, 34(4), 459–470.
- Cevallos, L., Rivadeneira Garcia, J. L., Andrade, B., Leiva, C., Sinde, I., Campoverde, J., Manguashca, J., & Toulkeridis, T. (2018). *A NDVI Analysis Contrasting Different Spectrum Data Methodologies Applied in Pasture Crops Previous Grazing – A Case Study from*

Ecuador. <https://doi.org/10.1109/ICEDEG.2018.8372375>

- Chávez, F. E. (2010). Determinación multielemental de macro y micronutrientes catiónicos en suelos por espectroscopía de emisión por acoplamiento de plasma inductivo y detección óptica ICP-OES. *Repositorio-Puce*, 1–131. <http://repositorio.puce.edu.ec/bitstream/handle/22000/4757/DISERTACIÓN.pdf>
- Chuvieco, E. (2006). *Teledetección ambiental: la observación de la tierra desde el espacio* (2ª ed. [ac] [Book]. Ariel.
- Collaguazo, G. E. (2014). Necesidades hídricas de pasturas con manejo convencional en la zona de influencia del canal de riego Cayambe-Pedro Moncayo (Tesis: Pregrado). *Universidad Politécnica Salesiana*, 111. <https://dspace.ups.edu.ec/bitstream/123456789/6225/1/UPS-YT00282.pdf>
- Curto, L., Covi, M., Gassmann, M. I., Cambereri, M., & Maggiora, A. (2016). CALIBRACIÓN DE DATOS OBSERVADOS DE CONTENIDO DE AGUA EN EL SUELO CON SENSORES CAPACITIVOS. *Meteorologica*, 41, 65–79.
- Elisei, J. (2017). *Influencia de la humedad del suelo en la resistencia a la penetración vertical*. 10(32), 18–20.
- ESPAC. (2021). Encuesta de Superficie y Producción Agropecuaria Continua 2020 Contenido. *INEC. Buenas Cifras Mejores Vidas*, 1–49.
- Espitia, E., Villaseñor, H., Tovar, R., Olan, M., & Limon, A. (2012). Momento óptimo de corte para rendimiento y calidad de variedades de avena forrajera. *Revista Mexicana de Ciencias Agrícolas*, 3(4), 771–783. http://www.scielo.org.pe/scielo.php?script=sci_arttext&pid=S1022-51292015000100013
- Fernández, R. J., & Trillo, N. (2005). La textura del suelo como fuente de heterogeneidad ; sus

- efectos sobre la oferta de agua para las plantas. *Researchgate*, January 2005, 171–192.
https://www.researchgate.net/profile/Roberto-Fernandez-10/publication/319872937_La_textura_del_suelo_como_fuente_de_heterogeneidad_sus_efectos_sobre_la_oferta_de_agua_para_las_plantas/links/59be7c51a6fdcca8e56cacfc/La-textura-del-suelo-como-fuente-de-hete
- Flores, S., & Lesino, G. (2016). Intercambiadores tierra aire. *INENCO - Instituto de Investigaciones En Energía No Convencional*, 16(1926), 812–815.
- Formoso, F. (2008). *Instalación de pasturas*. 52–56.
- Gaon, S. (2018). Contraste de los índices de vegetación por radiometría en relación a la digestibilidad in situ de dos gramíneas forrajeras. In *Departamento ciencias de la vida*.
<http://repositorio.espe.edu.ec/bitstream/21000/15869/1/T-IASA%0AI-005473.pdf>
- García-Ferrer, L., Bolaños-Aguilar, E. D., Ramos-Juárez, J., Osorio Arce, M., & Lagunes-Espinoza, L. D. C. (2015). Rendimiento y valor nutritivo de leguminosas forrajeras en dos épocas del año y cuatro edades de rebrote. *Revista Mexicana de Ciencias Pecuarias*, 6(4), 453. <https://doi.org/10.22319/rmcp.v6i4.4105>
- García, Emiliano, & Flego, F. (2005). Agricultura de Precisión. *Ciencia y Tecnología*, 8, 99–116.
<http://www.palermo.edu/ingenieria/downloads/pdfwebc&T8/8CyT12.pdf>
- García, Enrique. (2020). *Transito y efecto de la compactación de los tractores agrícolas en e cultivo de maiz*. (Vol. 2507, Issue February). UNIVERSIDAD AUTÓNOMA DEL ESTADO DE MÉXICO.
- González-Barrios, J. L., González-Cervantes, G., & Chávez-Ramírez, E. (2012). Porosidad del suelo en tres superficies típicas de la cuenca alla del río Nazas. *Tecnología y Ciencias Del Agua*, 3(1), 21–32.

- González, G. L., Rossi, C. A., Pereyra, A. M., de Magistris, A. A., Lacarra, H. R., & Varela, E. A. (2008). Determinación de la calidad forrajera en un pastizal natural de la región del delta bonaerense argentino. *Zootecnia Tropical*, 26(3), 223–225.
- Hernández-Garay, A., Martínez-Hernández, P. A., Zaragoza-Esparza, J., Vaquera-Huerta, H., Osnaya-Gallardo, F., Joaquín-Torres, B. M., & Velazco-Zebadúa, M. E. (2012). Caracterización Del Rendimiento De Forraje De Una Pradera De Alfalfa-Ovillo Al Variar La Frecuencia E Intensidad Del Pastoreo. *Revista Fitotecnia Mexicana*, 35(3), 259. <https://doi.org/10.35196/rfm.2012.3.259>
- Herrera Puebla, J., Díaz, C. D., González Robaina, F., & Lazo, G. C. (2016). Efecto del exceso de humedad del suelo sobre el rendimiento en algunos cultivos de importancia agrícola en Cuba. *Soil Water-Logging Effects on Yield of Some Important Agricultural Crops in Cuba.*, 6(2), 3–7. <http://search.ebscohost.com/login.aspx?direct=true&db=fap&AN=117783753&lang=es&site=e=ehost-live>
- INIAP. (2011). Guía del manejo de pastos en la sierra ecuatoriana. *Iniap*, 12–13.
- Landsat Missions. (2022). Landsat Soil Adjusted Vegetation Index. In *Usgs*. <https://www.usgs.gov/landsat-missions/landsat-soil-adjusted-vegetation-index>
- Laureda, D. A., Botta, G. F., Tolón Becerra, A., & Rosatto, H. G. (2016). Compactación del suelo inducida por la maquinaria en campos de polo en Argentina. *Revista de La Facultad de Ciencias Agrarias*, 48(1), 79–99.
- Leiva, F. R. (2003). La agricultura de precisión: una producción más sostenible y competitiva con visión futurista. *Memorias VIII Congreso de La Sociedad Colombiana de Fitomejoramiento y Producción de Cultivos*, January 2003, 8. http://www.researchgate.net/profile/Fabio_Leiva/publication/228425520_La_agricultura_de

_precisin_una_produccion_ms_sostenible_y_competitiva_con_visin_futurista/links/555ce20508ae8c0cab2a6901.pdf

León, R., Nancy, B., & Francisco, G. (2018). *Pastos y forrajes del Ecuador* (A. Yala (ed.); 3ra edición). Universidad Politécnica Salesiana.

Loza, P. (2016). *Caracterización de la Cobertura vegetal en los Páramos cercanos a la estación Cotopaxi del Instituto Espacial Ecuatoriano usando sensores remotos*. 103.

Luis, J., Latinoamericana, T., Ruiz-huanca, P., Palacios-vélez, E., Mejía-saenz, E., & Exebio-garcía, A. (2005). Early Estimation of Barley Yield Using Remote Sensing. *Redalyc.Org*, 23(2), 168.

Manzano, L., & Oña, D. (2016). *Análisis de la espectroscopia de reflectancia para la determinación de las propiedades químicas de suelos agrícolas en la parroquia de Lloa*.

Marcial, M. de J., & Ojeda, W. (2017). *Determinación De Variables Agronómicas Del Cultivo De Maíz Mediante Imágenes Obtenidas Desde Un Vehículo Aéreo No Tripulado (Vant)*. 101.
http://repositorio.imta.mx/bitstream/handle/20.500.12013/1750/T_075.pdf?sequence=1&isAllowed=y

Martin, E., & Muñoz, C. (2010a). *Métodos para Medir la Humedad del Suelo para la Programación del Riego*. September.

Martin, E., & Muñoz, C. (2010b). *Métodos para Medir la Humedad del Suelo para la Programación del Riego*. September.

Medina, C. (2016a). *Efectos De La Compactacion De Suelos Por El Pisoteo de animales, en la productividad de los suelos*. 8(1), 88–93.

Medina, C. (2016b). 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/>

Meneses, C. L. (2011). El índice normalizado diferencial de la vegetación. *Fao*, 62, 39–46.

<http://www.fao.org/3/i2560s/i2560s07.pdf>

Meza Bone, G. A., Cabrera Verdezoto, R. P., Jéssica Jessenia, M. M., Fabricio Fabián, M. B., César Alberto, C. V., Meza Bone, C. J., Meza Bone, J. S., Cabanilla Campos, M. G., López Mejía, F. X., Pincay Jiménez, J. L., Bohórquez Barros, T., & Ortiz Dicado, J. (2014). Improved fattening guinea pig (*Cavia porcellus* L.) based on tropical forage grasses and shrubs in Quevedo, Ecuador. *Idesia*, 32(3), 75–80. <https://doi.org/10.4067/S0718-34292014000300010>

Moreno, H., & Ibañez, S. (2020). Horizontes del suelo: Nomenclatura y designación de los horizontes genéticos. *Universitat Politècnica de València*, 1–10.

<https://riunet.upv.es/handle/10251/146032#.YaOyJHjKl6k.mendeley>

Nieto, G., Sánchez, R. M., & Gonzá, A. (2002). Uso de sensores remotos y SIG para delimitar los cambios en el uso del suelo agrícola de 1970 a 1997 en el estado de Guanajuato. *Investigaciones Geográficas*, 47, 92–112.

Novillo Espinoza, I. D., Carrillo Zenteno, M. D., Cargua Chavez, J. E., Nabel Moreiral, V., Albán Solarte, K. E., & Morales Intriago, F. L. (2018). Propiedades físicas del suelo en diferentes sistemas agrícolas en la provincia de Los Ríos, Ecuador. *Temas Agrarios*, 23(2), 177–187. <https://doi.org/10.21897/rta.v23i2.1301>

Núñez-Ramírez, Escobosa-García, I., Cárdenas-Salazar, V., Santillano-Cázares, J., Ruelas-Islas, J., Preciado-Rangel, P., & Díaz-Ramírez, J. (2020). Soil moisture tension, growth, water use efficiency, and yield of maize grown in northwest Mexico. *Terra Latinoamericana*, 38(4), 805–815. <https://doi.org/10.28940/terra.v38i4.763>

- Osuna-Ceja, E. S., Figueroa-Sandoval, B., Oleschko, K., Flores-Delgadillo, M. de L., Martínez-Menes, M. R., & González-Cossío, F. V. (2006). Efecto de la estructura del suelo sobre el desarrollo radicular del maíz con dos sistemas de labranza. *Agrociencia*, 40(1), 27–38.
- Ouerchefani, D., Dhaou, H., Abdeljaqued, S., Delaitre, E., & Callot, Y. (2009). Radiometric Indices for Monitoring Soil Surfaces in South Tunisia. *Journal of Arid Land Studies*, 19(1), 73–76.
- Ravi, A., King, D. A., & Sheppard, N. (1968). Infra-red spectra of nitrogen adsorbed on iridium. *Transactions of the Faraday Society*, 64, 3358–3360. <https://doi.org/10.1039/TF9686403358>
- Ruiz, I. G., Ortiz, M. S., Díaz, M. L. V., Betancourt, Y., & Rosa, J. (2010). Efecto de la compactación sobre las propiedades físicas del suelo y el crecimiento de la caña de azúcar. *Revista Ciencias Técnicas Agropecuarias*, 19(2), 51–56.
- Salcedo, E., Hernández, T., Galvis, A., Rodríguez, R., Zamora, F., Bugarin, R., & Carrillo, R. (2007). Available Moisture and its Relation with Organic Matter and Specific Soil Surface. *Terra Latinoamericana*, 25 (4)(Septiembre), 419–425.
- Sarría, F. (2006). Sistemas de Información Geográfica. Universidad de Murcia, departamento de Geografía. *Sistemas de Información Geográfica*, 239. <https://bit.ly/3sPPZI1>
- Sinde, I., Yáñez, D., Grefa, J. L., Arza, M., & Gil-Docampo, M. (2020). ESTIMACIÓN DEL RENDIMIENTO DEL PASTO MEDIANTE NDVI CALCULADO A PARTIR DE IMÁGENES MULTIESPECTRALES DE VEHÍCULOS AÉREOS NO TRIPULADOS (UAV). *Revista Geoespacial*, 17(1 SE-Artículos Técnicos), 25–38. <https://doi.org/10.24133/geoespacial.v17i1.1640>
- Skykas, D. (2019). Spectral Indices with Multispectral Satellite Data. In *Geo University* (p. 11). <https://www.geo.university/pages/spectral-indices-with-multispectral-satellite-data>
- Sönmez, N. K., Emekli, Y., Sari, M., & Baştuğ, R. (2008). Relationship between spectral

reflectance and water stress conditions of Bermuda grass (*Cynodon dactylon* L.). *New Zealand Journal of Agricultural Research*, 51(3), 223–233.
<https://doi.org/10.1080/00288230809510451>

Teuber, N. (1967). Manejo de pastoreo. *Angewandte Chemie International Edition*, 6(11), 951–952., 1, 9. <https://www.consorcirolechero.cl/chile/documentos/publicaciones/24junio/manejo-del-pastoreo.pdf>

Torres, J., Gutierrez, J. A., & Beltran, H. A. (2017). *Compactación , Una de las causas más comunes de la degradación del suelo*. 3, 18–22.

Vega Britez, G. D., Vargas Junior, F. M., Retore, M., Ledesma, L. L., & Silva, A. L. A. da. (2022). Rendimiento del quinto cuarto en corderos terminados en pasturas tropicales con o sin suplementación concentrada. *Ciencia & Tecnología Agropecuaria*, 23(1).
https://doi.org/10.21930/rcta.vol23_num1_art:2229

Villafuerte, L., Arze, J., & Ibrahim, M. (1999). Rendimiento de pasturas con y sin sombra en el trópico húmedo de Costa Rica. *Agroforesteria En Las Americas*, 1, 25.

Yepes, F. (1997). *Consideraciones básicas sobre picudos de importancia económica en Colombia* (U. N. DE COLOMBIA (ed.); primera). UNIVERSIDAD NACIONAL DE COLOMBIA.

Enlace:

https://drive.google.com/drive/folders/1dPu-ILj_u6o1_atqKeklo4RJAVEdw91n