



ESPE

UNIVERSIDAD DE LAS FUERZAS ARMADAS
INNOVACIÓN PARA LA EXCELENCIA

**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**

**TEMA: CONTRASTE DE LOS ÍNDICES DE VEGETACIÓN POR
RADIOMETRÍA EN RELACIÓN A LA DIGESTIBILIDAD IN SITU DE
DOS GRAMÍNEAS FORRAJERAS.**

AUTOR: GAON CORONEL, STEVEN MAURICIO

DIRECTOR: Ph.D. PÉREZ GUERRERO, PATRICIO ALEJANDRO

SANGOLQUÍ

2018



ESPE
UNIVERSIDAD DE LAS FUERZAS ARMADAS
INNOVACIÓN PARA LA EXCELENCIA

i

DEPARTAMENTO DE CIENCIAS DE LA VIDA Y DE LA AGRICULTURA
CARRERA DE INGENIERÍA AGROPECUARIA

CERTIFICACIÓN

Certifico que el trabajo de titulación, "**CONTRASTE DE LOS ÍNDICES DE VEGETACIÓN POR RADIOMETRÍA EN RELACIÓN A LA DIGESTIBILIDAD IN SITU DE DOS GRAMÍNEAS FORRAJERAS**" fue realizado por el señor *Gaón Coronel Steven Mauricio*, ha sido revisado en su totalidad y analizado por el software , de verificación de similitud de contenido; por lo tanto cumple con los requisitos teóricos, científicos, técnicos, metodológicos y legales establecidos por la Universidad de Fuerzas Armadas ESPE, razón por la cual me permito acreditar y autorizar para que lo sustente públicamente

Sangolquí, 06 de diciembre del 2018

Firma:

PhD. Pérez Guerrero Patricio Alejandro

C.C. 180294011



DEPARTAMENTO DE CIENCIAS DE LA VIDA Y DE LA AGRICULTURA

CARRERA DE INGENIERÍA AGROPECUARIA

AUTORÍA DE RESPONSABILIDAD

Yo, *Gaón Coronel Steven Mauricio*, declaro que el contenido, ideas y criterios del trabajo de titulación: *CONTRASTE DE LOS ÍNDICES DE VEGETACIÓN POR RADIOMETRÍA EN RELACIÓN A LA DIGESTIBILIDAD IN SITU DE DOS GRAMÍNEAS FORRAJERAS* es de mi autoría y responsabilidad, cumpliendo con los requisitos teóricos, científicos, técnicos, metodológicos y legales establecidos por la Universidad de Fuerzas Armadas ESPE, respetando los derechos intelectuales de terceros y referenciando las citas bibliográficas. Consecuentemente el contenido de la investigación mencionada es veraz.

Sangolquí, 06 de diciembre del 2018

Firma:

Steven Mauricio Gaón Coronel

C.C. 0421815139.....



DEPARTAMENTO DE CIENCIAS DE LA VIDA Y DE LA AGRICULTURA
CARRERA DE INGENIERÍA AGROPECUARIA

AUTORIZACIÓN

Yo, *Gaón Coronel Steven Mauricio*, autorizo a la Universidad de las Fuerzas Armadas ESPE publicar el trabajo de titulación: *CONTRASTE DE LOS ÍNDICES DE VEGETACIÓN POR RADIOMETRÍA EN RELACIÓN A LA DIGESTIBILIDAD IN SITU DE DOS GRAMÍNEAS FORRAJERAS* en el Repositorio Institucional, cuyo contenido, ideas y criterios son de mi responsabilidad.

Sangolquí, 06 de diciembre del 2018

Firma:

Steven Mauricio Gaón Coronel

C.C. *0401815139*

DEDICATORIA

A Dios

A mis padres Víctor y Grey

A mis hermanos Stalin y Stefani

A familia, amigos y personas especiales en mi vida

Con mucho amor y cariño les dedico todo mi esfuerzo

y trabajo puesto para la realización de esta tesis.

Steven Mauricio Gaón Coronel

AGRADECIMIENTOS

A la Universidad de las Fuerzas Armadas y a los docentes de la Carrera de Ingeniería Agropecuaria, que me han formado como profesional y me han brindado lecciones de vida, sin duda estoy orgulloso de culminar mis estudios en esta excelente Universidad.

A mi tutor, Ing. Patricio Pérez Guerrero, PhD, por su tiempo y apoyo en el desarrollo de este proyecto. A los ingenieros, Jakeline Torres e Izar Sinde quienes me ayudaron a solventar dudas y me guiaron de la mejor manera en la tesis.

A los laboratorios de la Institución IASA dirigidas por el Lcdo. Taco, por apoyarme con el análisis químico de las muestras de pasto, esencial para la investigación.

Al Instituto Espacial Ecuatoriano (IEE), por abrirme las puertas en la realización del trabajo de investigación. De manera muy especial al Ing. Javier Manguashca quien me ayudó a la consolidación del tema de nuestra investigación y quien con mucha paciencia colaboró siempre durante el desarrollo de la misma, gracias por su apoyo y amistad durante todo este proceso. También quiero agradecer a la Ing. Lorena Lasso por ayudarme con sus conocimientos en partes fundamentales de nuestra investigación.

A mi padre por ayudarme en la fase de campo, gracias por acompañarme en la toma de datos y a mi madre por estar pendiente siempre del desarrollo de la tesis.

A mis amigos, Verence, Magali, Samanta por todos los momentos que vivimos dentro y fuera de la Universidad. A Megan, Fabricio y María por escucharme, apoyarme siempre y ser mis confidentes. En fin, gracias a todos ustedes por su amistad porque hicieron que los días malos fueran llevaderos y que la vida universitaria fuera la mejor etapa.

A Stalin, Stefani y Carlita que a pesar de los percances, siempre han estado para mí, brindándome apoyo moral o ayudándome de la manera que sea y compartiendo conmigo este proceso.

También quiero agradecer a todas las personas con las que tuve el gusto de cruzar mi camino durante esta etapa, me enseñaron grandes lecciones y ocupan un lugar en mi corazón.

ÍNDICE DE CONTENIDOS

CARÁTULA

CERTIFICACIÓN	i
AUTORÍA DE RESPONSABILIDAD	ii
AUTORIZACIÓN	iii
DEDICATORIA	iv
AGRADECIMIENTOS	v
ÍNDICE DE CONTENIDOS	vi
ÍNDICE DE TABLAS	ix
ÍNDICE DE FIGURAS	x
RESUMEN	xi
ABSTRACT	xii

CAPÍTULO I

ASPECTOS GENERALES

1.1 Antecedentes	1
1.2 Justificación.....	2
1.3 Planteamiento del problema	3
1.4 Estudios relacionados.....	4
1.5 Objetivos	5
1.6 Hipótesis.....	5
1.7 Metas del Proyecto.....	5

CAPÍTULO II

MARCO TEÓRICO

2.1 Teledetección.....	6
2.2 Espectro Electromagnético.....	7
2.3 Interacciones de la energía electromagnética con la materia	8
2.4 Firmas Espectrales	10
2.5 Firmas espectrales y reflectancia en la vegetación	11
2.6 Firmas espectrales y reflectancia en el suelo.....	13
2.7 Índices de Vegetación	14

2.7.1	Índice de Vegetación de Diferencia Normalizada (NDVI).....	15
2.7.2	Índice de Vegetación Ajustado al Suelo (SAVI).....	16
2.7.3	Índice del contenido de clorofila	16
2.8	Radiación Fotosintéticamente Activa (PAR)	17
2.9	Pastos	18
2.10	Características Nutricionales de los forrajes	19
2.11	Gramíneas.....	20
2.11.1	Rye Grass	21
2.11.2	Rye Grass Anual (<i>Lolium multiflorum</i>)	22
2.11.3	Rye Grass perenne (<i>Lolium perenne</i>)	23
2.12	Desarrollo fenológico del pasto.....	23
2.13	Morfología de gramíneas	24
2.14	Morfogénesis de gramíneas forrajeras y estructura de las pasturas.....	26
2.15	Fertilización convencional de pastos	27
2.16	Digestibilidad de alimentos en rumiantes	28

CAPÍTULO III

METODOLOGÍA

3.1	Ubicación del lugar de investigación.....	30
3.2	Materiales y Equipos.....	32
3.3	Diseño experimental	33
3.3.1	Factores a probar.....	33
3.4	Tratamientos a comparar.....	34
3.5	Características de las UE.....	36
3.6	Croquis del diseño	36
3.7	Análisis de varianza.....	37
3.8	Análisis funcional	37
3.9	Métodos.....	38
3.10	Respuesta espectral	38
3.11	Análisis proximal.....	38
3.12	Digestibilidad con la técnica in situ.....	39
3.13	VARIABLES A MEDIR.....	39
3.14	Filocrono y número de días por corte	40

3.15	Índices de vegetación.....	40
3.15.1	Índice de Vegetación de Diferencia Normalizada (NDVI).....	41
3.15.2	Índice de Vegetación Ajustado al Suelo (SAVI).....	42
3.15.3	Índice del contenido de clorofila	42
3.16	Análisis proximal.....	43
3.16.1	Determinación del contenido proteico	43
3.16.2	Determinación del contenido de grasa.....	44
3.16.3	Determinación del contenido de fibra.....	45
3.16.4	Determinación de humedad y cenizas.....	46
3.17	Porcentaje de digestibilidad	47

CAPÍTULO IV

RESULTADOS Y DISCUSIÓN

4.1	Variables	48
4.1.1	Filocrono y número de días por corte	48
4.1.2	Índices de vegetación.....	51
4.1.3	Normalized Difference Vegetation Index (NDVI)	52
4.1.4	Soil Adjusted Vegetation Index (SAVI)	55
4.1.5	Chlorophyll Content Index (CCI).....	58
4.1.6	Resultados de la relación entre índices de vegetación.....	61
4.1.7	Digestibilidad in situ	62
4.1.8	Resultados de la relación entre NDVI vs Digestibilidad	67

CAPÍTULO V

CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES

5.1	Conclusiones.....	70
5.2	Recomendaciones	71
5.3	Bibliografía.....	73

ÍNDICE DE TABLAS

Tabla 1	<i>Estudios relacionados a nivel internacional</i>	4
Tabla 2	<i>Descripción de las regiones del espectro electromagnético</i>	8
Tabla 3	<i>Tratamientos a comparar</i>	34
Tabla 4	<i>Análisis de varianza</i>	37
Tabla 5	<i>Características determinadas de Senitel 2B</i>	42
Tabla 6	<i>Prueba de Tukey al 5% para el filocrono promedio entre la interacción Variedad vs Corte</i>	49
Tabla 7	<i>Prueba de Tukey al 5% para el filocrono promedio entre la interacción Variedad vs Fertilización</i>	49
Tabla 8	<i>Análisis de Varianza de NDVI promedio entre factores y su interacción</i>	53
Tabla 9	<i>Prueba de Tukey al 5% para NDVI promedio entre la interacción Fertilización vs Variedad vs Corte</i>	53
Tabla 10	<i>Prueba de Tukey al 5% para NDVI promedio entre la interacción Variedad vs Corte</i>	53
Tabla 11	<i>Análisis de Varianza de SAVI promedio entre factores y su interacción</i>	56
Tabla 12	<i>Prueba de Tukey al 5% para SAVI promedio entre la interacción Fertilización vs Variedad vs Corte</i>	56
Tabla 13	<i>Prueba de Tukey al 5% para SAVI promedio entre la interacción Variedad vs Corte</i>	57
Tabla 14	<i>Análisis de Varianza de CCI promedio entre factores y su interacción</i>	59
Tabla 15	<i>Prueba de Tukey al 5% para CCI promedio entre la interacción Topografía vs Fertilización</i>	59
Tabla 16	<i>Prueba de Tukey al 5% para CCI promedio entre la interacción Fertilización vs Variedad vs Corte</i>	60
Tabla 17	<i>Análisis de Varianza para Digestibilidad a 24 horas promedio entre factores y su interacción</i>	64
Tabla 18	<i>Prueba de Tukey al 5% para Digestibilidad a 24 horas promedio entre la interacción Topografía vs Fertilización vs Variedad vs Corte</i>	64

ÍNDICE DE FIGURAS

Figura 1 Espectro electromagnético	7
Figura 2 Procesos de Interacción entre la energía.....	9
Figura 3 Firmas espectrales típicas para distintas coberturas	11
Figura 4 Firma espectral típica de vegetación y su comportamiento	13
Figura 5 Comportamiento espectral de algunos minerales en el suelo	14
Figura 6 Espectro de absorción de pigmentos: Clorofila a, b y carotenos	18
Figura 7 Curva de crecimiento de gramíneas forrajeras en fases	24
Figura 8 Representación esquemática de un.....	25
Figura 9 Localización del sitio.....	30
Figura 10 Croquis del diseño	36
Figura 11 Toma de datos espectrales en campo.....	38
Figura 12 Longitudes de onda capturadas con espectroradiómetro	41
Figura 13 Análisis de proteína - Método Kjeldalh.....	44
Figura 14 Análisis de grasa - Método Soxhlet.....	45
Figura 15 Análisis de fibra - Método químico gravimétrico	46
Figura 16 Análisis de digestibilidad in situ	47
Figura 17 Índices de vegetación por tratamientos obtenidos por radiometría de campo	52
Figura 18 Índices de vegetación vs Fertilización - Rye grass anual	61
Figura 19 Índices de vegetación vs Fertilización - Rye grass perenne	62
Figura 20 Resultados de porcentaje de digestibilidad in situ a 24 horas.....	62
Figura 21 Resultados análisis bromatológicos en porcentaje (%) por tratamientos.	66
Figura 22 NDVI vs Digestibilidad – Rye grass perenne	68
Figura 23 NDVI vs Digestibilidad - Rye grass anual.....	68

RESUMEN

Se evaluó el potencial del espectro radiómetro de campo para predecir la calidad nutritiva del pasto estableciendo una relación positiva y predictiva relacionando índices de vegetación (NDVI – SAVI – CCI) con el porcentaje de digestibilidad in situ de dos variedades de gramíneas forrajeras (Rye grass anual – Rye grass perenne) bajo dos niveles de topografía (plano – pendiente), fertilización (fertilizado – no fertilizado) y en tres estados de corte (1.5 – 2.5 – 3.5 hojas). De igual forma se realizó un seguimiento a la tasa de aparición de hojas o filocrono de acuerdo a los grados día acumulado y un análisis bromatológico de cada uno de los tratamientos. Con respecto al filocrono, se observó únicamente interacción significativa entre corte y variedades. Los índices de vegetación calculados presentaron similar comportamiento en el progreso del desarrollo fenológico de la planta, sin existir una interacción significativa con respecto a la topografía del terreno para NDVI, SAVI y CCI. Los porcentajes de digestibilidad fueron elevados en el segundo corte (2.5 hojas), con valores nutricionales altos referente a proteína, grasa y fibra, presentando diferencia significativa entre la interacción topografía, fertilización y corte. Finalmente se obtuvo que para Rye grass perenne los valores más altos de digestibilidad se presentan en el segundo corte con 61,44% con fertilización y 50.57% sin fertilización, cuyos valores se encuentran relacionados al del NDVI de 0.56 y 0.41. De igual forma para Rye grass anual presenta valores de 60.73% con fertilización y 52.36% sin fertilización con NDVI de 0.53 y 0.42, considerados valores apropiados para la predicción.

PALABRAS CLAVE:

-) AGRICULTURA DE PRECISIÓN**
-) ESPECTRORADIOMETRÍA**
-) ÍNDICES DE VEGETACIÓN**
-) DIGESTIBILIDAD IN SITU**
-) RYE GRASS**

ABSTRACT

The potential of the field radiometer spectrum was assessed to predict the nutritive quality of the pasture by establishing a positive and predictive relationship relating vegetation indexes (NDVI – SAVI – CCI) with the percentage of in situ digestibility of two varieties of Forage grasses (annual rye grass – perennial rye grass) under two levels of topography (flat – slope), fertilization (fertilized – unfertilized) and three cutting states (1.5 – 2.5 – 3.5 leaves). Similarly, the rate of appearance of leaves or filocrono was monitored according to the accumulated day and a bromatologic analysis of each of the treatments. With regard to Filocrono, only significant interaction between cut and varieties was observed. The calculated vegetation indexes showed similar behavior in the progress of the phenological development of the plant, without a significant interaction with respect to land topography for NDVI, SAVI and CCI. The percentages of digestibility were elevated in the second cut (2.5 leaves), with high nutritional values related to protein, fat and fiber, presenting a significant difference between the interaction topography, fertilization and cutting. Finally, it was obtained that for perennial Rye grass the highest digestibility values are presented in the second cut with 61.44% fertilization and 50.57% without fertilization, whose values are related to the NDVI of 0.56 and 0.41. Similarly for annual Rye grass presents values of 60.73% with fertilization and 52.36% without fertilization with NDVI of 0.53 and 0.42, considered values appropriate for prediction.

KEY WORDS:

-) **PRECISION AGRICULTURE**
-) **SPECTRORADIOMETRY**
-) **IN SITU DIGESTIBILITY**
-) **VEGETATION INDEX**
-) **RYE GRASS**

CAPÍTULO I

ASPECTOS GENERALES

La radiometría se presenta como una técnica de uso potencial aplicable a suelos dedicados a la producción agrícolas; por lo tanto, en el presente capítulo se exponen aspectos generales y necesarios de los cuales partirá este estudio con el fin de evaluar el uso de esta técnica con la producción de pastizales enfocados a la alimentación animal.

1.1 Antecedentes

Los distintos sistemas de producción agrícola y ganadero en el país se encuentran afectados principalmente por el alto costo de agroinsumos, en el manejo agronómico de las pasturas, así como un inadecuado intervalo de pastoreo de las praderas, desaprovechando todo el potencial productivo y nutritivo de las mismas; es por esta razón que, la agricultura de precisión por medio de la espectroradiometría de campo a través del uso de mecanismos tecnológicos que permiten medir respuestas espectrales en relación al comportamiento y crecimiento de las pasturas propone disminuir considerablemente excesivos costos de fertilización (INIAP, 2015).

Ante la necesidad de obtener una mayor cantidad de follaje destinado al consumo de animales altamente productivos que contengan alta carga nutricional y energética, es indispensable realizar un análisis químico de los forrajes con el fin de determinar su contenido nutricional en términos de proteína, grasa, fibra y otros componentes que favorecen o inhiben la utilización de los mismos por el animal (FAO, 2017). De igual forma la realización de ensayos in situ de digestibilidad de pastos en diferentes épocas de corte, estado vegetativo (rebrotos), forma de presentación (entero - picado), fertilización y topografía del terreno

(plano - pendiente), permitirán determinar el porcentaje de nutrientes digeribles por el animal (A. & Chilibroste, 2001).

Por tal motivo para el presente trabajo de investigación se realizó la toma de firmas espectrales con espectroradiómetro de campo a rye grass anual (*Lolium multiflorum*) y rye grass perenne (*Lolium perenne*), a las cuales se les realizó la evaluación del contenido nutricional mediante un análisis proximal y la digestibilidad in situ en vacas fistuladas para establecer su relación con los índices de vegetación NDVI, SAVI y CCI.

1.2 Justificación

A nivel mundial la agricultura viene enfrentando, a lo largo del tiempo, el constante desafío de aumentar la producción agrícola y productos pecuarios en respuesta a la creciente demanda de la población. Este aumento, a su vez, se ha producido con la expansión de nuevas áreas agrícolas, y dentro de cada área, con el aumento de los rendimientos (FAO, 2017). Sin embargo, con la innovación de las prácticas agrícolas, surgen nuevos desafíos que en respuesta a ellos se propone la generación de tecnologías que permitan desarrollar técnicas, con el objeto de cuantificar y manejar diferenciadamente la variabilidad natural del área productora (Cenicaña, 2015).

Una de estas tecnologías, es la teledetección, que se está utilizando como una herramienta para ayudar en la investigación, principalmente en la producción de pastizales, proporcionando evaluaciones no destructivas, cuantitativas y permitir a los productores tomar decisiones al obtener información oportuna y espacialmente distribuida sobre el cultivo (Kemal Sönmez, Emekli, Sari, & Bastug, 2008).

A nivel productivo los pastizales requieren de un adecuado manejo para que puedan ser consumidos por el ganado, en donde se tenga la mayor cantidad de nutrientes con un porcentaje de digestibilidad por sobre el 80%. Es así que las tecnologías de teledetección se están utilizando como herramientas para ayudar en la preparación de inventarios de recursos de pastizales, análisis, modelización y pronóstico para apoyar la toma de decisiones, ya que los métodos basados en reflectancia podrían usarse para cuantificar de manera fiable la cubierta de pastos a partir de las imágenes o firmas espectrales (Cenicaña, 2015).

1.3 Planteamiento del problema

El problema

Existe un desaprovechamiento productivo de las pasturas dirigido hacia la obtención de productos de origen animal debido al desconocimiento y costos de adquisición de tecnologías de agricultura de precisión que permitan optimizar los ciclos de pastoreo en gramíneas forrajeras y su relación con el contenido nutricional y digestibilidad de los mismos.

Las causas

-) El desconocimiento de las tecnologías usadas en agricultura de precisión como la espectroradiometría de campo y su aplicación en el campo agronómico y pecuario.
-) La falta de accesibilidad de las ganaderías a las distintas tecnologías de agricultura de precisión.
-) La metodología destructiva empleada actualmente para determinar estados óptimos de corte de pasturas.

Los efectos

-) Altos costos en implementación y fertilización de pasturas.
-) Bajo aprovechamiento nutricional y digestible de las pasturas para el consumo de los animales.
-) Inadecuado manejo agronómico de las pasturas.

1.4 Estudios relacionados

Diversas investigaciones se han desarrollado a nivel internacional en relación al uso de radiometría aplicada al estudio de pastos enfocados a la producción animal, algunas de ellas se muestran en la Tabla 1, pues complementan y respaldan la presente investigación.

Tabla 1

Estudios relacionados a nivel internacional

Tema	Autor	Institución/Año
Estimación de la productividad primaria neta aérea (PPNA) del forraje de pastos para los sistemas de producción ganadera mediante sensores remotos.	Padilla, Guillermo	Universidad del Valle, 2017
Relationship between Remote Sensing Data, Plant Biomass and Soil Nitrogen Dynamics in Intensively Managed Grasslands under Controlled Conditions.	Knoblauch, C; Watson, C; Berendonk, C; Becker, R; Wrage-Mönnig, N; Wichern, F	Rhine-Waal University of Applied Sciences, 2017
Evaluación del crecimiento de pastos usando índices de vegetación calculados a partir de información satelital	Ramirez, Alejandro	Universidad Nacional de Colombia, 2013
Development and validation of near-infrared spectroscopy for the prediction of forage quality parameters in <i>Lolium multiflorum</i> .	Yang, Z; Nie, G; Pan, L; Zhang, Y; Huang, L; Ma, X; Zhang, X	Sichuan Agricultural University, 2017

1.5 Objetivos

1.5.1 Objetivo General

Contrastar los índices de vegetación por radiometría en relación al porcentaje de digestibilidad in situ de dos gramíneas forrajeras en tres etapas de corte (1,5 -2,5 -3,5 hojas).

1.5.2 Objetivos Específicos

-) Identificar el filocrono (tasa de aparición de hojas) y tiempo de rebrote (días) para cada etapa de corte (1,5 -2,5 -3,5 hojas) en dos gramíneas forrajeras.
-) Determinar los valores de los índices de vegetación mediante radiometría de campo de dos gramíneas forrajeras en tres etapas de corte (1,5 -2,5 -3,5 hojas).
-) Establecer los valores de digestibilidad in situ de dos gramíneas forrajeras en tres etapas de corte (1,5 -2,5 -3,5 hojas).

1.6 Hipótesis

Hi: Existe una relación entre los índices de vegetación obtenidos por radiómetro de campo y el porcentaje digestibilidad de rye grass anual y rye grass perenne.

Ho: No existe una relación entre los índices de vegetación obtenidos por radiómetro de campo y el porcentaje digestibilidad de rye grass anual y rye grass perenne.

1.7 Metas del Proyecto

-) Filocrono para cada corte y crecimiento de hoja.
-) Una base de datos digital de firmas espectrales de las gramíneas forrajeras en cada corte.
-) Una base de datos digital con los valores bromatológicos y digestibilidad in situ de dos gramíneas forrajeras.
-) Índices de vegetación tabulados de las gramíneas forrajeras.

CAPÍTULO II

MARCO TEÓRICO

2.1 Teledetección

La Teledetección, según Chuvieco (2008), es considerada una nueva tecnología que permite obtener información sobre un cuerpo/objeto a diferentes distancias de la superficie de la tierra, mediante el uso de sensores aéreos o espaciales, sin que exista contacto entre el observador y el objeto o sistema observado.

Parte del principio físico de la existencia de una perturbación (energía electromagnética, ondas de presión, campos gravitacionales) que el sistema observado produce en el medio como consecuencia de su interacción con las fuentes de energía propia o externa, la cual se transmite al sistema receptor para poder registrar, almacenar e interpretar la información (Torrijos, 2008).

En sí el portador de esta información es la radiación electromagnética, que puede ser emitida por el objeto o proceder de otro cuerpo y haber sido reflejada por este. Así, cada objeto o sistema tendrá una respuesta espectral propia, en términos de energía reflejada y energía emitida, lo que se conoce como "firma espectral". Por lo cual la teledetección tiene por objeto la identificación de los materiales y fenómenos que tienen lugar en la superficie de la tierra a través de firmas espectrales (Torrijos, 2008).

2.2 Espectro Electromagnético

El espectro electromagnético (EE) es un flujo continuo de energía que se desplaza por el espacio o la atmósfera cuya fuente son las ondas electromagnéticas, siendo de origen natural o artificial, que tienden a interactuar con objetos que se encuentra en su camino a través de la generación de vibraciones que producen perturbaciones a través del campo eléctrico y campo magnético (Hernández & Montaner, 2009).

La presencia del espectro es debido a que el rango conocido del mismo no tiene longitudes bien definidas, siendo la longitud de Planck ($1,616252 \times 10^{-35}$ metros) la más pequeña y la longitud más grande el tamaño del universo mismo; es decir, desde casi cero hasta el infinito positivo (Casanova, 2011) (Luque, 2017).

Considerando variable discriminadora la longitud de onda, es posible diferenciar entre distintos tipos de energía electromagnética. En la figura 1 se describen las principales zonas del EE (espectro electromagnético), incluyendo longitudes de onda pequeñas (Rayos gamma, rayos X y ultravioleta) hasta aquellas que son muy largas (microondas y comunicaciones) (KhanAcademy, 2017).

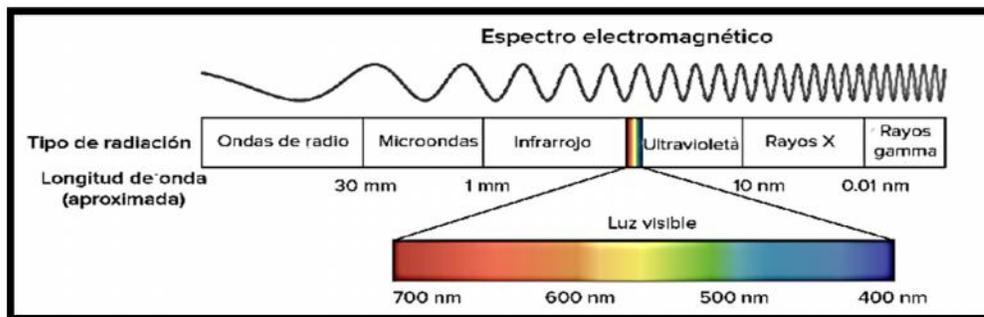


Figura 1. Espectro electromagnético
Fuente: (KhanAcademy, 2017)

Por efecto de la complejidad del espectro electromagnético, varios estudios han propuesto la división del mismo con el fin de estudiar y relacionar cada región con diferentes ramas de la ciencia. En la tabla 2 se visualiza la segmentación en donde se describen las denominaciones y sus respectivas longitudes de onda (Hernández & Montaner, 2009).

Tabla 2

*Descripción de las regiones del espectro electromagnético
(1 μ m= 10-6 m; 1nm=10-9 m)*

	Denominación	Longitud de onda
Radiación indirectamente ionizante	Rayos Gamma	< 10pm
	Rayos X	10 pm – 10 nm
Luz ultravioleta	Ultravioleta extremo	10 - 280 nm
	Ultravioleta medio	280 – 315nm
	Ultravioleta cercano	315- 400 nm
Luz visible	Luz visible	0,4 – 0,7 μ m
	Infrarrojo Cercano	0,7 μ m – 1,3 μ m
Luz infrarroja	Infrarrojo medio	1,3 μ m – 8 μ m
	Infrarrojo Lejano	8 μ m – 14 μ m
	Microondas	14 μ m – 30 cm
Radio	Ultra alta frecuencia de radio (UHF)	30 cm – 1 cm
	Muy alta frecuencia de radio (VHF)	1 cm – 10 m
	Radio de onda corta	10 m – 180 m
	Radio de onda media (AM)	180 m – 650 m
	Radio de onda larga	650 m – 1 km
	Radio de onda muy larga	>10 km

Fuente: (Hernández & Montaner, 2009)

2.3 Interacciones de la energía electromagnética con la materia

La energía electromagnética que llega a la superficie terrestre interactúa con cada tipo de material (materia), ya sea esta sólida, líquida o gaseosa y se denomina radiación incidente.

En la figura 2 se muestran varios tipos de interacciones de energía electromagnética al estar en contacto con la superficie terrestre, los cuales son descritos a continuación:

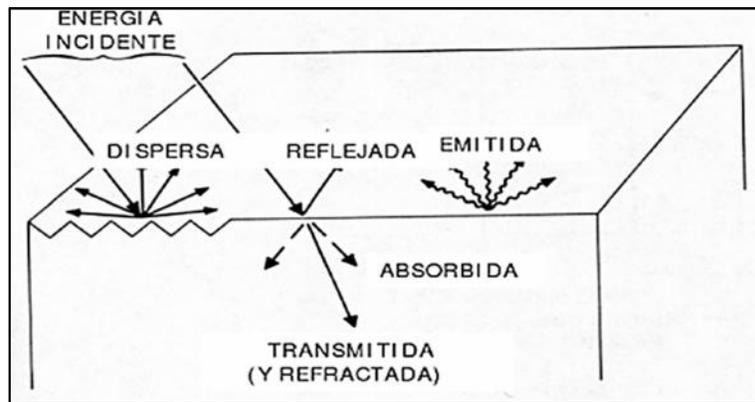


Figura 2. Procesos de Interacción entre la energía electromagnética y la materia

Fuente: (Pérez & Muñoz, 2006)

Según Sarría & Palazón (2008), es necesario considerar algunos términos pertenecientes al proceso de interacción de la luz con la materia, los cuales son:

-) **Emitancia (M).**- Se refiere a la energía emitida desde una fuente por unidad de tiempo y de superficie en función de su estructura y temperatura.
-) **Irradiancia (E).**- Se define de manera similar a la emitancia pero referido a la energía que llega a un cuerpo procedente de otro que la ha emitido.
-) **Radiancia (L).**- Es el flujo radiante que deja una unidad de área en una particular y sólida dirección y ángulo. Su importancia radica en que es la magnitud que detecta el sensor.
-) **Reflectancia ().**- También conocido como albedo, en la cual la reflexión es provocada por superficies que son "lisas" y toda (o la mayor parte de la energía) es reflejada en una dirección única, en relación con la longitud de onda de la radiación incidente que ocurre cuando la superficie es rugosa y la energía es reflejada uniformemente en todas las direcciones, es adimensional.

-) **Absorbancia** ().- Es la parte de la irradiancia que absorbe la superficie receptora, invirtiendo mayor parte de su energía en el calentamiento de la materia, es adimensional.
-) **Transmitancia** ().- Transmite la superficie receptora (parte de la irradiancia), y es adimensional. La transmisión de la energía a través de medios de diferentes densidades, como por ejemplo del aire al agua, provoca un cambio en la velocidad de la radiación electromagnética.

Es necesario considerar que las distintas radiancias espectrales que son reflejadas desde la superficie terrestre hacia un sensor es afectada por varios factores, tales como las condiciones atmosféricas, meteorológicas, de la radiación solar, las propiedades reflectivas de la superficie y las condiciones del sensor (Sarría & Palazón, 2008).

2.4 Firmas Espectrales

También conocida como curva de reflectividad espectral o curva de respuesta espectral, se define como el comportamiento diferencial de la radiación reflejada (reflectancia) o emitida (emitancia) desde algún tipo de objeto o superficie en los distintos rangos de espectro electromagnético (Hernández & Montaner, 2009).

Es usada para la extracción de las características espectrales de un objeto y permite conocer el rango del espectro electromagnético en el cual los datos se deben obtener para desarrollar determinada aplicación mediante la utilización de sensores óptico-electrónicos usados a nivel terrestre, en campo o con satélites (Arbelo, 2015).

Una forma gráfica de estudiar este comportamiento es disponer los datos de reflectancia (%) en el eje Y, y la longitud de onda en el eje X, teniendo de esta forma una firma espectral bidimensional como se observa en la figura 3 (Hernández & Montaner, 2009).

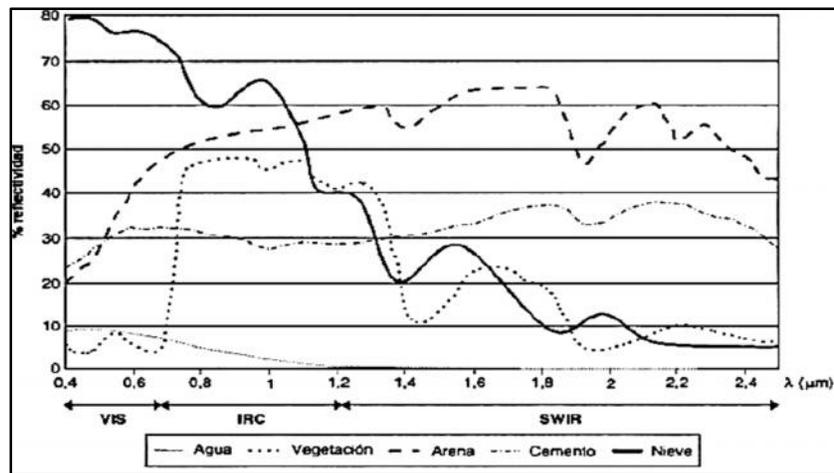


Figura 3. Firmas espectrales típicas para distintas coberturas
Fuente: (Chuvieco, 2008)

2.5 Firmas espectrales y reflectancia en la vegetación

Los distintos tipos de pigmentos en la estructura de las hojas, así como el contenido de humedad modifican principalmente los niveles de reflectancia en la vegetación. Es así que los pigmentos afectan a las longitudes de onda del espectro visible (0,4-0,7 μm) donde el 65% es absorbido por la clorofila, el 29% por la xantofila y el 6% por carotenos, es por esto que el ojo humano percibe la vegetación sana de color verde, pues existe una gran absorción en el rojo y el azul, y alta reflexión en el verde. Sin embargo, cuando la vegetación está enferma, la clorofila se ve disminuida, lo cual provoca generalmente un incremento en la reflectividad en el rojo, dando como resultado un tono amarillento en las hojas (combinación de rojo y verde). La estructura de las hojas (capa esponjosa del mesófilo) a su vez aumenta la reflectividad en la zona del infrarrojo cercano (0,8-1,1 μm). Finalmente, entre los rangos 1,4 -1,8 μm

(infrarrojo medio) la reflectividad depende principalmente del contenido de humedad (agua) entre y dentro de las células, es decir que en condiciones normales de hidratación, ambos valles son profundos y marcados y en estrés hídrico son menos marcados aumentando su reflectividad (Hernández & Montaner, 2009).

En la vegetación, la firma espectral se caracteriza por presentar un contraste entre las regiones de espectro adecuados al rojo visible y al infrarrojo cercano. Por tal motivo, en la banda roja del espectro visible (entre 600 y 700 nm), la vegetación sana ofrece una baja reflectividad y alta en el infrarrojo próximo (entre 800 y 1000 nm), es decir que cuando aumente el “vigor” que presente la vegetación, aumentará proporcionalmente el contraste entre los valores de reflectancia captados en ambas bandas como se observa en la figura 4 (Alonso, Moreno, & Rodríguez, 1999).

Las siguientes franjas se establecen en la región del visible:

- J 400-500 nm: Clorofila, el caroteno y la xantofila intervienen en la absorción.
- J 500-600 nm: El nivel de absorción es menor y la percepción del color verde de la planta depende de esta región ya que la reflectancia es algo superior en las regiones azul y roja adyacentes.
- J 600-700 nm: Fuerte absorción producida por la clorofila, siendo menor en el envés de las hojas.
- J 700-800 nm: Los altos niveles de reflectancia que comienzan hacia los 750 nm se producen por la transición entre la zona de absorción de la clorofila.
- J 800 y 1100 nm: La región del infrarrojo próximo (Alonso, Moreno, & Rodríguez, 1999).

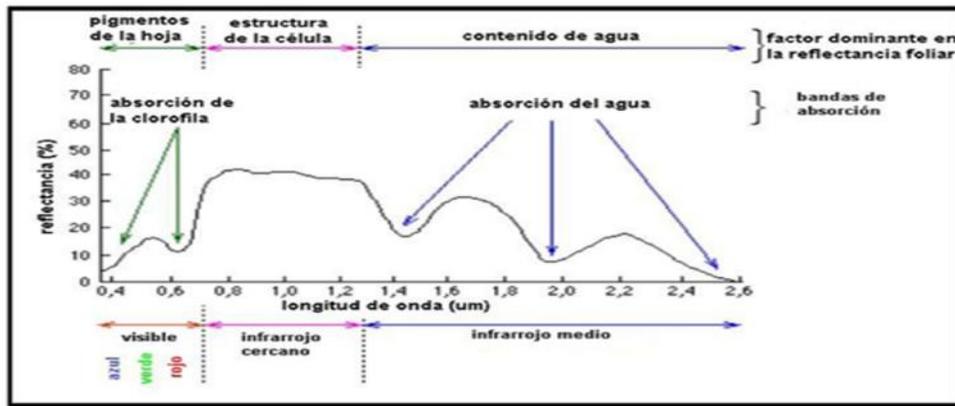


Figura 4. Firma espectral típica de vegetación y su comportamiento
Fuente: (Karszenbaum & Barraza, 2000)

2.6 Firmas espectrales y reflectancia en el suelo

El comportamiento espectral que presentan los suelos se encuentra afectado principalmente por el color y el contenido de humedad. Es así que cuando los suelos se encuentran secos, las tierras presentan mayor reflectancia en relación a que cuando se encuentran húmedos ya que poseen una reflectancia en promedio tres veces más débil que los suelos secos, registrando diferencias más notables en la zona del infrarrojo cercano. De igual forma el contenido de minerales, materia orgánica, textura, estructura, disposición horizontal y vertical, así como los ángulos de luminosidad y observación de éstos, perturban la reflectancia que presenten los suelos (Hernández & Montaner, 2009). En la figura 5, se aprecia el comportamiento de la reflectancia espectral de algunos minerales.

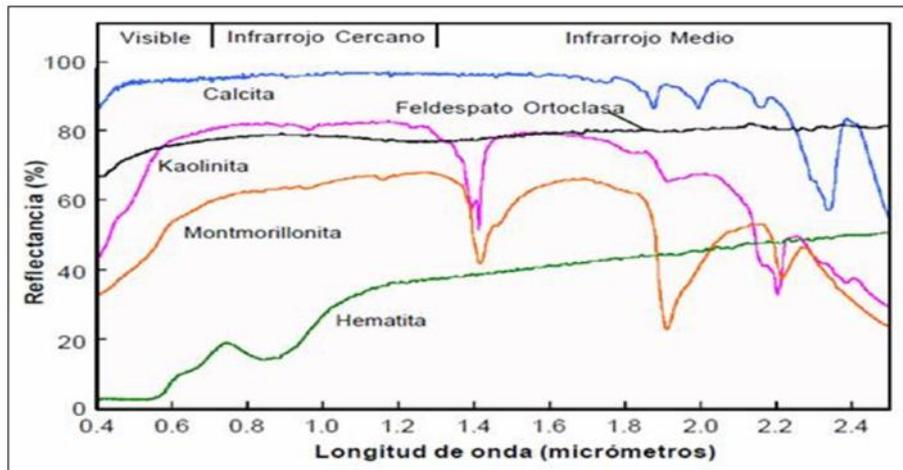


Figura 5. Comportamiento espectral de algunos minerales en el suelo

Fuente: (Pérez & Muñoz, 2006)

2.7 Índices de Vegetación

Los índices de vegetación son medidas calculadas a partir de los valores de reflectancia a distintas longitudes de onda, con el fin de obtener información relacionada con las características de la vegetación (vigor, medidas de biomasa), reduciendo la posible influencia de componentes externos como las propiedades ópticas del suelo, la irradiación solar, entre otros.

No se puede considerar un índice de vegetación ideal, debido a que los índices documentados son aproximaciones al ideal, todos se encuentran basados en la utilización de las bandas roja e infrarroja, pues son las que contienen más del 90% de la información espectral de la cobertura vegetal (Pérez & Muñoz, 2006).

Entre estos índices podemos destacar los siguientes:

2.7.1 Índice de Vegetación de Diferencia Normalizada (NDVI)

Normalized Difference Vegetation Index – NDVI (por sus siglas en inglés). Es un parámetro numérico que permite estimar y evaluar el estado de salud de la vegetación, calculados a partir de valores de reflectancia (radiación que las plantas emiten o reflejan) a distintas longitudes de onda, y es particularmente sensible a la cubierta vegetal. Estos índices no miden directamente la productividad ni disponibilidad forrajera, pero tienen una estrecha relación con estas variables (Ortega, 2015).

El NDVI es un índice no dimensional y que al ser normalizado, toma valores entre -1 y +1. Si el resultado es menor a 0.1, se trata de cuerpos de agua o tierra desnuda; mientras que, si toma valores cercanos a 1, se interpreta que existe una mayor actividad fotosintética (Meneses, 2012). Para cálculo de este índice en base a las bandas de un sensor es:

$$N = \frac{N - R}{N + R}$$

El algoritmo NDVI resta valores de reflectancia de color rojo desde el infrarrojo cercano y lo divide para la suma de las bandas del infrarrojo cercano y rojo (Yates, Tarpley, Schneider, McGinnis, & Scofield, 1984).

Es necesario para una adecuada interpretación de NDVI, considerar los distintos ciclos fenológicos de la vegetación en estudio y datos sobre su desarrollo anual, con el fin de distinguir las oscilaciones naturales de la planta y los cambios en la distribución espacial causados por otros factores (Gómez, 2004).

2.7.2 Índice de Vegetación Ajustado al Suelo (SAVI)

Soil Adjusted Vegetation Index – SAVI (por sus siglas en inglés) es un índice que se utiliza con el fin de corregir algunos efectos externos al valor del NDVI en lugares donde el aporte de la reflectividad del suelo es elevado (Huete, 1988). Por esta razón, al índice NDVI se le incluye el factor L, que varía según la densidad de la vegetación y que está relacionado con la reflectividad del suelo (Gonzaga, 2014).

Para realizar el cálculo del valor de SAVI, se utiliza la siguiente ecuación propuesta por Huete (1988):

$$S. = \frac{I_1 - R}{I_1 + R + L} (1 + L)$$

Donde IR es la banda del infrarrojo cercano, R es la banda del rojo y L es el factor “línea del suelo”. Los valores de L pueden variar entre 0 y 1, dependiendo de la densidad de la vegetación (valores más altos para densidades más bajas; 0.5 si se trata de densidades intermedias) (Sánchez, y otros, 2000).

2.7.3 Índice del contenido de clorofila

Chlorophyll Content Index – CCI (por sus siglas en inglés), fue desarrollado con el objetivo de estimar la cantidad de clorofila que presente en las hojas de forma individual (Sims, y otros, 2006). Se obtiene a partir de la altura de los dos picos que se observan en la primera derivada de la reflectancia espectral de la vegetación, en la región del borde rojo entre las longitudes de onda entre 700 y 750nm. Para poder obtener dicha relación, mediante estudios preliminares se ha establecido la siguiente fórmula de cálculo (Ortega, 2015):

$$C = \frac{D_7}{D_7}$$

Donde D es la reflectancia y cada subíndice es la longitud de onda en nanómetros. El rango típico de valores se encuentra entre 0,5 y 1,5 la mayoría de valores deben encontrarse cercanos a 1 (Ortega, 2015).

La obtención de este índice se puede realizar a través de un análisis no destructivo; por ejemplo, mediante el uso del ceptómetro, mediante el cual se obtiene información de diagnóstico tales como: nutrientes y manejo de riego, control de plagas, evaluación del estrés ambiental y mejoramiento de cultivos (ApogeeInstruments, 2016).

2.8 Radiación Fotosintéticamente Activa (PAR)

La radiación fotosintéticamente activa (PAR), presenta una longitud de onda dentro del espectro comprendido entre 0.40 y 0.70 μm . Los valores del PAR son relevantes como parámetro de la influencia de la energía en distintos procesos o comportamientos biológicos y su evaluación temporal tiene singular interés en seguir el crecimiento de los cultivos.

Este rango es utilizado, ya que, para realizar la fotosíntesis, las plantas dependen de la absorción de la luz a través de unas moléculas llamadas pigmentos (clorofila a, clorofila b y caroteno), que absorben y reflejan de distinta manera la luz como se puede ver en la figura 6; sin embargo, todos estos pigmentos tienen su máxima absorción en el rango espectral mencionado con anterioridad (KhanAcademy, 2017).

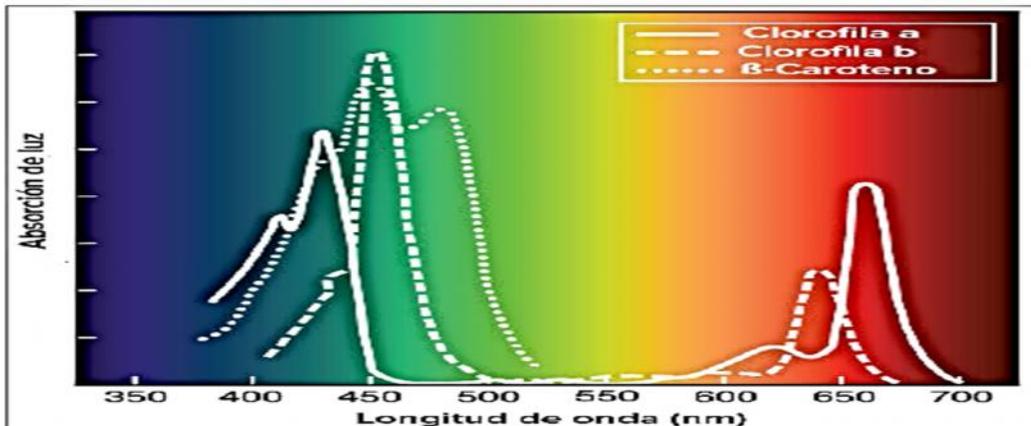


Figura 6. Espectro de absorción de pigmentos: Clorofila a, b y carotenos
Fuente: (KhanAcademy, 2017)

Debido a que las plantas realizan fotosíntesis y que el PAR es su fuente de energía, conocer la distribución espacial y temporal del mismo es fundamental para el análisis de los procesos biológicos asociados (Grossi, 2014).

2.9 Pastos

El pasto constituye la base principal de la alimentación de los animales herbívoros con fines de explotación productiva, ya sea de leche o carne; convirtiéndose en la herramienta primordial para optimizar la producción animal por ser una fuente de alimento barato y nutricionalmente completo (flujo de energía y proteína) (Collahuazo, 2014).

Los pastos son plantas superiores de alimentación autótrofa, es decir, elaboran su propio alimento, toman la luz solar con el follaje, sustancias minerales y agua a través de sus raíces y mediante ello forman la materia orgánica de su organismo enfocado a la generación de tejidos, siendo un proceso implícitamente continuo, mientras las condiciones climáticas lo permiten (Collahuazo, 2014).

Sin embargo, para la obtención de los beneficios de los pastos se debe llevar a cabo un correcto manejo agronómico de los mismos con el fin de desarrollar todo su potencial nutritivo para las funciones de crecimiento, desarrollo, producción y reproducción en los animales (Bernal, 2005).

La importancia de los pastos es cada día más notoria, la agricultura basada en la producción de pastos, ha llegado a ser la ciencia de la agricultura forrajera, ya que comprende varios campos de acción como en las ciencias del suelo, en la agronomía y en la zootecnia. Su integración en un programa agrícola satisface numerosos objetivos, entre estos el proteger al suelo de los factores climáticos, son incluidos en la rotación de cosechas para evitar el monocultivo, enriquecen el suelo y aumentan los rendimientos de las cosechas que le siguen (Hernández, Tapia, & Buller, 1956).

2.10 Características Nutricionales de los forrajes

Las pasturas y otros tipos de forrajes, muestran gran variación en su valor nutritivo en sus distintas etapas de crecimiento y en las diferentes fracciones de la planta. Estas diferencias se deben, además, a las variaciones en las condiciones ambientales (suelo, clima, fertilizaciones), al material genético y al manejo. La composición de la materia seca de todas las pasturas es muy variable y el contenido de humedad es alto y variable (60-85%) (Giraldo, 2007). Las pasturas de alta calidad son aquellas que poseen bajos valores de fibra y elevados de proteína, expresándose como energía metabolizable (EM). El contenido de fibra (relacionado con la digestibilidad del alimento) puede llegar hasta el 90 % (fibra detergente neutro) y de proteína, según la madurez, las gramíneas contienen de 8 a 18% (según el nivel de fertilización con nitrógeno) (Cenicaña, 2015).

Cuando las gramíneas y otro tipo de pastos (leguminosas) maduran, disminuye su digestibilidad, debido a un incremento en la relación tallo: hoja, sumado a una importante reducción en la digestibilidad de los tallos. Los cambio en la composición química asociados a un incremento en la madurez resultan en una reducción de los carbohidratos fácilmente fermentables (contenido celular), un incremento de los carbohidratos estructurales (celulosa y hemicelulosa) y de lignina (Gualavisí, 2013).

Como fue mencionado, el valor nutritivo de los forrajes depende de la etapa de crecimiento en que se encuentran cuando son cosechados o pastoreados. El crecimiento se divide en tres etapas de desarrollo (Rocha & Changoliusa, 2011).

-) Etapa Vegetativa
-) Etapa de Floración
-) Etapa de formación de semillas

La concentración de proteína, energía, minerales y materia seca digestible en una planta madura se reducen significativamente mientras aumenta la concentración de fibra. Cuando aumenta el contenido de fibra, aumentan los porcentajes de lignina, haciendo a los carbohidratos menos disponibles a los microorganismos del rumen y por ende menos aprovechables en la nutrición animal (Rocha & Changoliusa, 2011).

2.11 Gramíneas

Las gramíneas constituyen el volumen más importante de forraje para la alimentación animal. En la mayoría de los países productores de leche, el follaje de las gramíneas y los granos de estas, constituyen la base de la alimentación del ganado.

La principal fuente de alimento la constituyen los pastizales nativos y las especies forrajeras cultivadas tanto anuales como perennes, que representan la principal ventaja económica de la producción pecuaria (INIAP, 2015).

2.11.1 Rye Grass

Es una gramínea de rápido crecimiento con gran amplitud altitudinal de crecimiento, sobrepasando los 3.200 m.s.n.m., con una temperatura que oscila entre los 12° a 22 °C para un óptimo crecimiento; este tipo de cultivo requiere suelos con fertilidad media a alta, que posean drenajes apropiados, con un pH de 6,6 a 7,3 (INIAP, 2015). Presenta dos variedades: perenne (*Lolium perenne*) y anual (*Lolium multiflorum*) cuya diferencia radica en el tiempo de duración pues el perenne es constante mientras que el anual dura cada año (Olate, 2010).

La plantación de Rye grass crece rápidamente cuya ventaja es su alta capacidad de adaptación a todo tipo de suelo y tiene elevados rendimientos para la ganadería. Es la mejor elección forrajera debido a su rápida germinación para crecer y desarrollarse además de sus elevados rendimientos, calidad nutritiva y alta resistencia al pisoteo (Castellanos J. , 2015).

El Rye grass es un cultivo que crece en matas espesas de baja a mediana estatura con tallos lisos de hasta 1,3 cm de diámetro. Su sistema radicular permite la captación de agua a nivel superficial. El crecimiento de la planta inicia entre los 8 y 15 días de la siembra. Finalmente, en la fase de floración la planta puede llegar a medir hasta 20 cm de altura (Olate, 2010).

Taxonomía

Reino	Plantae
Subreino	Trachebionta
División	Magnoliophyta
Clase	Liliopsida
Subclase	Commelindiae
Orden	Poales
Familia	Poaceae
Subfamilia	Pooideae
Tribu	Poaeae
Género	Lolium L

2.11.2 Rye Grass Anual (*Lolium multiflorum*)

Es una especie que puede crecer por uno, dos y en algunos casos por periodos mayores al año sin llegar a ser perenne. Posee tallos lisos o ásperos hacia su extremo superior, hojas con lígula membranosa de 1-2 mm y aurículas e inflorescencia en espiga (generalmente con 11-22 espiguillas). Presenta una rápida emergencia, alta velocidad de implantación, soporta el pisoteo, heladas, abundante producción de forraje verde, mayor que la especie perenne. Por su crecimiento erecto da la sensación de abundancia y tiene la capacidad de producir semilla, requiere suelos fértiles.

El valor nutrimental de este forraje es de 15 a 18 % de proteína cruda, 70 a 80 % de digestibilidad y 2.96 Mcal/Kg-1/MS de EM-1 (Paladines P. , 2005).

2.11.3 Rye Grass perenne (*Lolium perenne*)

Forma matas densas con abundantes macollos y follaje, por lo cual su altura varía de 30-60 cm. A medida que crece se puede observar que presenta hojas cortas, lampiñas (que no presentan vellosidades) y rígidas plegadas en la yema, el envés es de color verde oscuro muy brillante con gran capacidad de ahijado, los tallos vegetativos son erectos, con abundantes hojas que surgen intravaginalmente. Presentan espigas delgadas y relativamente rígidas. Su sistema radicular es muy denso y superficial lo que le hace muy sensible a los efectos de la sequía y responde muy bien a la fertilización nitrogenada (Pearson & Ison, 1997).

Las variedades diploides contienen entre el 15-17.5% de proteína y las variedades tetraploides el 25%, 80% de digestibilidad y 3-3.4 Mcal/Kg-1/MS de EM-1 (Paladines, Izquierdo, & Salazar, 2003).

2.12 Desarrollo fenológico del pasto

La fenología del pasto se define como las distintas fases o etapas por las que pasa una planta a lo largo de su desarrollo siguiendo un ritmo periódico (brotación, floración, dispersión de semillas, etc.), a lo largo de los años (Fillat & García, 2008). La latitud y altitud de la zona de estudio, época en que se realizan las observaciones, tipo de suelo, genotipo empleado, entre otros son aspectos claves en la diferenciación de los distintos fenotipos.

El crecimiento de los pastizales sigue una curva sigmoidea, desde su establecimiento hasta su “estado estable” que se alcanza cuando la canopia intercepta la radiación, y el crecimiento de nuevas hojas, tallos y raíces es aproximadamente equivalente a la muerte de órganos viejo (Pearson & Ison, 1997).

En la curva de desarrollo de las gramíneas forrajeras se pueden describir tres fases o etapas definidas, de acuerdo al porcentaje de desarrollo foliar y el porcentaje de cubrimiento del suelo (Collahuazo, 2014).

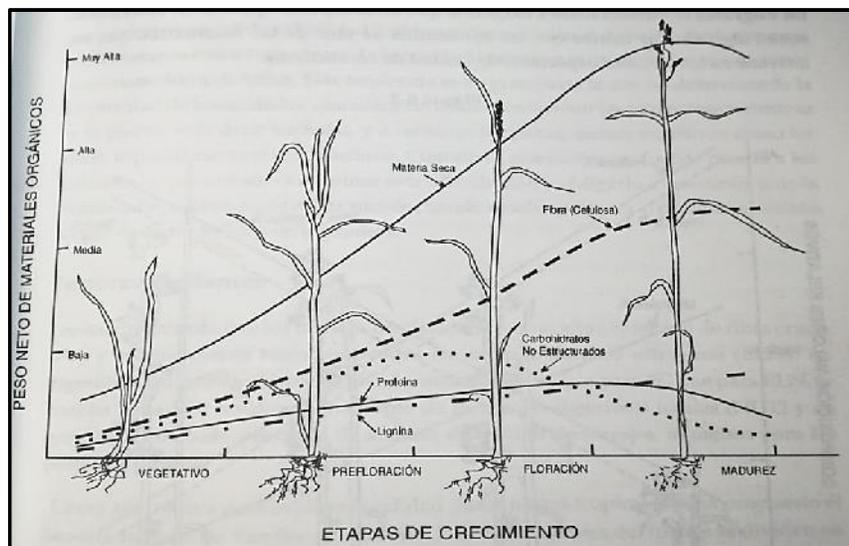


Figura 7. Curva de crecimiento de gramíneas forrajeras en fases
Fuente: (Collahuazo, 2014)

El conocimiento de la fenología del pasto, es útil en la asesoría del agricultor sobre épocas de siembra, aplicaciones de riego y épocas de cosecha, movimientos de mano de obra, etc. Determina zonas tardías y tempranas, mejora la exactitud de modelos de producción de cultivos, ya que permite tener en cuenta periodos reales en el desarrollo y no meses calendario (Larios, 1982).

2.13 Morfología de gramíneas

El macollo de una gramínea representa una unidad morfofisiológica; cada macollo está formado por la repetición de unidades similares denominadas fitómeros, diferenciadas a partir

del mismo meristema apical. El fitómero de una gramínea consiste de una hoja, nudo, entrenudo, meristema axilar y meristema intercalar; el número y longitud de los fitómeros determina variaciones en macollos individuales, y el arreglo espacial de macollos en una planta determina su estructura: macollos intravaginales generalmente dan una forma de crecimiento compacta, en tanto que macollos extravaginales determinan mayor distancia entre macollos dando una forma de crecimiento esparcida (Briske, 1991).

En un macollo, la diferenciación de células del meristema apical origina primordios de hoja y yemas axilares capaces de originar un nuevo macollo. Los primordios foliares continúan su desarrollo y forman una hoja la cual se hace visible por dentro del conjunto de vainas (Figura 8).

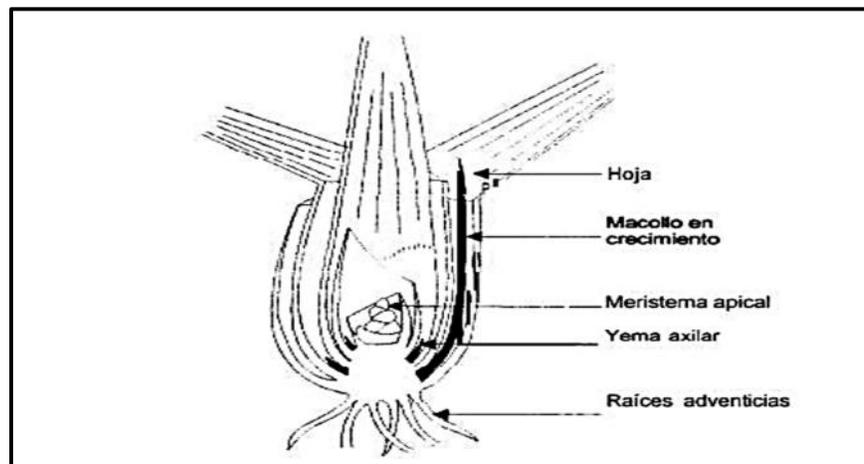


Figura 8. Representación esquemática de un macollo de gramínea
Fuente: (Agnusdei, 1997)

Las hojas tienen un ciclo de vida limitado. Luego de crecer, cada hoja comienza a senescer y muere. Las gramíneas forrajeras tienen un máximo número de hojas vivas y llegado ese valor, por cada hoja nueva que se produce, la hoja más vieja muere (Davies A. , 1988).

Por ejemplo, en Rye grass perenne el promedio de hojas vivas por macollo raramente excede 3, y la aparición de una cuarta hoja tiende a ser contrabalanceada por la pérdida de la primera que se formó. El primer macollo generalmente emerge de la axila de la primera hoja sobre el tallo principal, una vez que se acumulan dos hojas sucesivas expandidas (Robson, Ryle, & Wodledge, 1988).

Debido a que no todas las yemas tienen capacidad para desarrollar un nuevo macollo, para lo cual se introdujo el concepto de 'site filling', definido como la capacidad de las yemas axilares para desarrollar un nuevo macollo, el mismo se expresa como el número de nuevos macollos por intervalo de aparición de hojas (Davies A. , 1974). Es así que el 'Site filling' y la tasa de aparición de hojas constituye, por lo tanto, los factores internos que regulan el proceso de macollaje de una gramínea. Los macollos desarrollados a partir de yemas axilares del tallo principal, se denominan macollos primarios, ellos producen macollos secundarios, y así sucesivamente, de esta manera, cada planta desarrolla una jerarquía de macollos.

2.14 Morfogénesis de gramíneas forrajeras y estructura de las pasturas

El término morfogénesis abarca los cambios estructurales que se producen a través del desarrollo de un organismo, y puede ser definido a partir de los procesos de formación, expansión y muerte de órganos (Chapman & Lemaire, 1993). Las variables morfogenéticas en un macollo de gramínea se relacionan, por lo tanto, a los siguientes procesos:

J) Tasa de aparición de hojas: es el intervalo entre la aparición de dos hojas sucesivas en un macollo. Sin embargo, debido a la estrecha relación con la temperatura puede ser calculado como suma térmica (producto del intervalo en días, por la temperatura media diaria del intervalo). En este caso, se denomina Filocrono y su unidad es grados día.

-) Tasa de elongación foliar: se refiere al incremento en longitud de lámina verde en un intervalo de tiempo o de suma térmica. La elongación foliar es la principal expresión del crecimiento de una hoja. El ancho foliar presenta normalmente variaciones de menor magnitud.
-) Vida media foliar: es el intervalo transcurrido entre la aparición de una hoja y el comienzo de la senescencia. Puede ser expresada como número de intervalos de aparición de hojas. Las hojas tienen una vida limitada, siendo ésta una característica relativamente estable para cada genotipo. Luego de crecer, cada hoja comienza a senescer y muere. La tasa de aparición y elongación de hojas y la vida media foliar, son las variables que determinan mayoritariamente los cambios de estructura que experimentan los macollos en el transcurso de su desarrollo (Davies A. , 1988).

2.15 Fertilización convencional de pastos

La práctica de fertilización de pastos es de suma importancia para mejorar el rendimiento productivo de los mismos, para ello es importante conocer los elementos que influyen en obtener dichos rendimientos y aquellos que limitan la productividad de los pastos, por presentar deficiencias más acentuadas como son el nitrógeno y el fósforo (Cabalceta, 1999).

-) Nitrógeno: Es el principal elemento que limita el crecimiento de las plantas forrajeras y en el caso particular de las gramíneas, por lo que tiene la mayor importancia en la producción de materia seca e influye en la calidad de los pastos, al intervenir en el contenido de proteína cruda y digestibilidad. La respuesta de los forrajes a la fertilización nitrogenada puede variar dependiendo de la dosis, frecuencia de aplicación, especie

forrajera y su manejo, clima, tipo de suelo, elementos limitantes, riego, fertilización utilizada y época del año (Paladines P. , 2005).

- J) Fósforo: Su absorción ocurre como ion H_2PO_4^- (predominan en suelos con pH entre 2 y 7) y HPO_4^{2-} (pH entre 7 y 12). El fósforo soluble en la solución del suelo se encuentra en cantidades pequeñas (menos de 0.2 mg/L), por lo que existe la necesidad de reponer H_2PO_4^- en la solución del suelo, dependiendo de la solubilidad y las cantidades de diferentes fosfatos presentes en la fase sólida del suelo (Arbitto, 2011).
- J) Potasio: Es absorbido como el ion K^+ , en cantidades a veces mayores que cualquier otro elemento mineral. Es probablemente el elemento más móvil en la planta, siendo translocado a los tejidos meristemáticos cuando se presenta deficientemente en el tejido vegetal. Su función es de naturaleza catalítica; es imprescindible en el metabolismo de carbohidratos, formación, transformación y translocación de almidón; metabolismo del nitrógeno y síntesis de proteína, controla y regula la actividad de otros elementos esenciales (Cabalceta, 1999).
- J) Magnesio: Es el único mineral constituyente de la molécula de clorofila, localizándose en su centro, de allí su importancia en el proceso de fotosíntesis. Interviene en la síntesis de proteínas y como activador de muchas enzimas. Se absorbe como Mg^{2+} . El magnesio ha adquirido relevancia en el sistema animal -planta, por cuanto su deficiencia en los pastizales es una causa de tetania (hipomagnesemia) en los animales de pastoreo (Arbitto, 2011).

2.16 Digestibilidad de alimentos en rumiantes

La digestibilidad de un alimento se puede definir como la cantidad de alimento que ingiere el animal y no se elimina con las heces por lo que se supone que fue absorbida. El

valor nutritivo de los alimentos está determinado por la biodisponibilidad de nutrientes y la dinámica de los procesos de solubilización e hidrólisis en el tracto gastrointestinal por lo que no siendo suficientes los análisis químicos, se deben considerar los procesos de digestión, absorción y metabolismo animal para determinar los correctos indicativos nutricionales del alimento suministrado (Giraldo, 2007).

Los parámetros de la cinética de fermentación describen la digestión y caracterizan propiedades intrínsecas del alimento que limitan su disponibilidad para el rumiante determinando la proporción de nutrientes consumidos que pueden ser absorbidos y utilizados por el animal, y dependen de un activo crecimiento y desarrollo de la población microbiana del rumen (A. & Chilibroste, 2001).

En gramíneas las variaciones de la digestibilidad son causada por factores genéticos, ambientales, nutricionales y estado fenológico de la planta principalmente, es así que en las hojas puede variar de 18% a 84 % con una media de 54% . La variación en la digestibilidad de los tallos también es causada por los mismos factores que se mencionaron para la fracción hoja. (Hacker, 1981).

De igual forma se considera que la degradación ruminal de los compuestos nitrogenados de las gramíneas suele ser elevado en forrajes inmaduros aunque descienden a medida que los forrajes maduran. El contenido de nitrógeno no proteico varía con el estado fisiológico de las plantas, cuanto más favorables son las condiciones para el crecimiento, mayor es el contenido en nitrógeno no proteico y en nitrógeno total algunos de los contenidos de nutrientes en gramíneas (Giraldo, 2007)

CAPÍTULO III

METODOLOGÍA

3.1 Ubicación del lugar de investigación

El presente estudio se realizó en la provincia de Pichincha, cantón Rumiñahui, parroquia San Fernando, en la Hacienda El Prado en la Carrera de Ingeniería Agropecuaria IASA I, de la Universidad de las Fuerzas Armadas - ESPE.

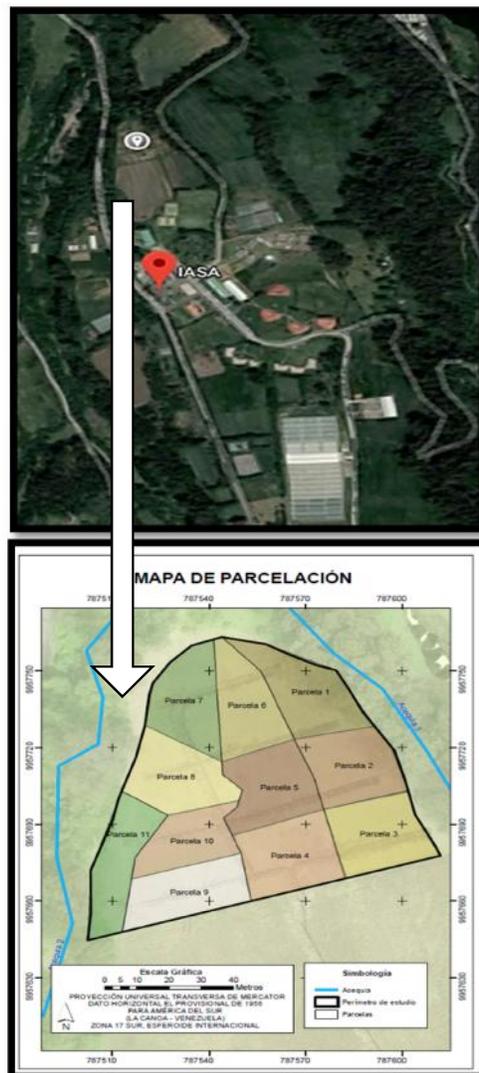


Figura 9. Localización del sitio de estudio

Ubicación geopolítica

Provincia: Pichincha
Cantón: Rumiñahui
Parroquia: San Fernando
Sector: Hcda. El Prado

Ubicación geográfica

Altitud: 2740 m.s.n.m.
Latitud: 0°23'20"S
Longitud: 78°24'44"O

Ubicación ecológica

Zona ecológica: Montano bajo
Altitud: 2748 msnm
Temperatura máxima: 1.30 °C
Temperatura mínima: 6,74 °C
Precipitación anual: 1531 mm
Heliofanía: 4 - 5 horas
Horas luz: 12 horas
Humedad relativa: 64.11%
Suelo: Franco arcilloso

3.2 Materiales y Equipos

Los materiales que se utilizaron para el desarrollo de la presente investigación se detallan de la siguiente manera:

Materiales de campo

-) Análisis de Suelo
-) Azadones y Rastrillos
-) Sistema de riego
-) Cortadora de césped

Materiales de laboratorio

-) Bolsas de nylon (15 cm x 20 cm)
-) Matraces Erlenmeyer
-) Balón aforador
-) Sifón Soxhlet
-) Destilador

Equipos

-) Espectro radiómetro Field Spec Hi Res 4
-) Computadora portátil
-) Programa RS3
-) Balanza analítica
-) Secadora
-) Digestor con extractor de vapores Kjeldahl

-) Destilador Kjeldahl
-) Sellador de fundas de nylon

Reactivos

-) Semillas de Rye grass anual y Rye grass perenne
-) Fertilizante 10-30-10
-) Catalizador Kjeldahl
-) Acetona
-) Hidróxido de sodio
-) Ácido bórico
-) Ácido clorhídrico

3.3 Diseño experimental

Para el presente estudio se aplicó un Diseño de Parcela Subdividida que comprende los siguientes factores:

3.3.1 Factores a probar

Topografía del suelo

-) P0: Plano
-) P1: Pendiente

Fertilización

-) F0: Sin fertilización
-) F1: Con fertilización

Tipo de Rye grass

) R1: Rye grass anual

) R2: Rye grass perenne

Cortes (Variable temporal de medición)

) Corte 1 (1.5 hojas)

) Corte 2 (2.5 hojas)

) Corte 3 (3.5 hojas)

3.4 Tratamientos a comparar**Tabla 3***Tratamientos a comparar*

N°	Nomenclatura	Descripción
T1	P0F0R1	Plano, sin fertilización, Rye grass anual
T2	P0F0R2	Plano, sin fertilización, Rye grass perenne
T3	P0F1R1	Plano, con fertilización, Rye grass anual
T4	P0F1R2	Plano, con fertilización, Rye grass perenne
T5	P1F0R1	Pendiente, sin fertilización, Rye grass anual
T6	P1F0R2	Pendiente, sin fertilización, Rye grass perenne
T7	P1F1R1	Pendiente, con fertilización, Rye grass anual
T8	P1F1R2	Pendientes, con fertilización, Rye grass perenne

Modelo matemático

$$Y_{ijk} = u + T_i + F_j + (TF)_{ij} + e_{ij} + V_k + (FV)_{jk} + e_{jk(i)} + C_l + (FC)_{jl} + (CV)_{kl} + (FVC)_{jkl} + e_{ijk}$$

Donde:

Y_{ijk} = Variables a medir

u = media general

T_i = Efecto de la Topografía (bloque)_i

F_j = Efecto de la j-ésima Fertilización

(TF) _{ij} = Efecto de la interacción Topografía*Fertilización.

e_{ij} = error del tipo de Topografía.

V_k = Efecto de la k-ésima Variedad.

(FV) _{jk} = Efecto de la interacción Fertilización*Variedad

E_{jk} (i) = error de la Variedad

C_l = Efecto de la k-ésimo corte

(FC) _{jl} = Efecto de la interacción Fertilización*Corte

(CV) _{kl} = Efecto de la interacción Corte*Variedad

(FVC) _{jkl} = Efecto de la interacción Fertilización* Variedad*Corte

e_{ijkl} = error del Tipo de rye grass

Repeticiones

Se considerarán tres repeticiones por cada tratamiento.

3.5 Características de las UE

-) Número de Unidades Experimentales: 24
-) Área de las unidades experimentales: 80 m²
-) Largo: 10m. – Ancho: 8 m
-) Forma de la UE: Rectangular
-) Área neta del ensayo: 1920 m²

3.6 Croquis del diseño

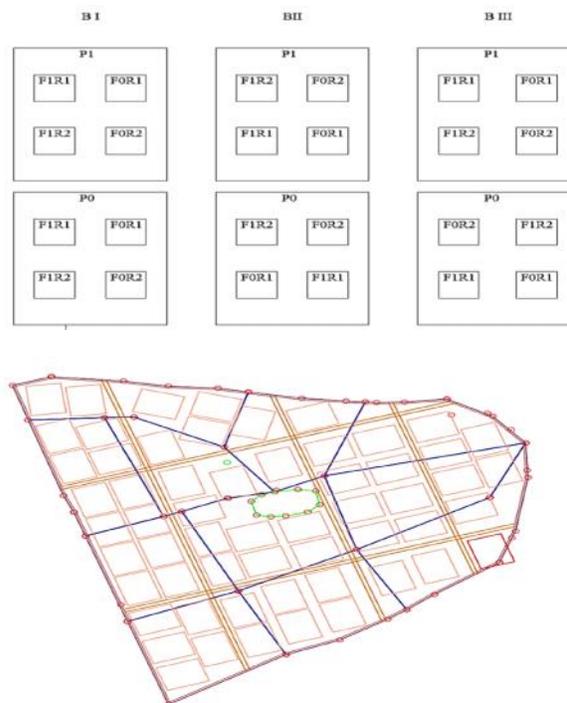


Figura 10. Croquis del diseño

3.7 Análisis de varianza

Tabla 4

Análisis de varianza

	Fuentes de Variación	Grados de Libertad
Total		23
Topografía		1
Fertilización		1
Niveles de Fertilización * Topografía		1
Tipo de Rye grass		1
Niveles de Fertilización * Variedad		1
Error Tipo de Rye grass		2
Corte		2
Fertilización * Corte		2
Tipo de Rye grass * Corte		2
Niveles de Fertilización * Tipo de Rye grass*Corte		2
Error Tipo de Rye grass		8

Coefficiente de variación

$$CV = \frac{\sqrt{\frac{\sum x_1^2 - (\sum x_1)^2 / n}{n-1}}}{X}$$

3.8 Análisis funcional

Para la presente investigación se realizó una prueba de comparación de medias de Tukey con un nivel de confianza del 95% con la finalidad de que al culminar el ensayo se pueda determinar el índice espectral en relación al porcentaje de digestibilidad más alto. El análisis estadístico se realizará con el software InfoStat versión 2016.

3.9 Métodos

3.10 Respuesta espectral

Con el espectro radiómetro Field Spec Hi Res 4 se registraron las firmas espectrales de cada una de las 24 parcelas de 80 m² en tres etapas de corte (1.5 – 2.5 – 3.5 hojas), en 5 puntos diferentes garantizando uniformidad de los datos. En cada punto se tomaron 5 datos a una altura aproximada de 30 cm sobre el suelo y con un IFOV de 1°. La captura de los datos con el espectralradiómetro mediante el software RS3.



Figura 11. Toma de datos espectrales en campo

3.11 Análisis proximal

Para analizar el contenido nutricional de los pastos (Rye grass anual y Rye grass perenne) se realizaron por triplicado las siguientes pruebas bromatológicas: Kjledahl para la determinación del contenido proteico, Soxhlet para precisar el contenido de grasas, método químico gravimétrico para conocer el porcentaje total de fibra cruda y técnicas de secado y calcinación para obtener el porcentaje de humedad y cenizas respectivamente. Los protocolos de cada ensayo se realizaron en base a las normas técnicas ecuatorianas para la determinación

del contenido nutricional de alimentos, sobre producción y manejo de datos de composición química de alimentos en nutrición (INEN, 1981; FAO, 1997).

3.12 Digestibilidad con la técnica in situ

Para determinar el porcentaje de digestibilidad se utilizó una vaca fistulada para simular el proceso de digestión in situ de las gramíneas forrajeras en estudio, por lo cual se preparó 174 bolsas nylon de 15x20cm con un tamaño de poro ideal (50 μm) para permitir el paso de microorganismos y no dejar que el ingrediente o la pastura a suministrarse se salga; se registró su respectivo peso en seco y se añadió 5g de cada muestra correspondiente a cada tratamiento con su respectiva repetición, las cuales fueron cerradas completamente con el sellador de bolsas y colocadas en otra bolsa más grande.

Se utilizó una vaca fistulada a la cual se le colocó una bolsa con las correspondientes muestras, las cuales anteriormente fueron colocadas en un termo a 38°C con el fin de obtener la temperatura del rumen durante un tiempo de 10 minutos y se procedió a colocar las muestras en el rumen de la vaca.

Después de 24 horas en el rumen de la vaca, la bolsa respectiva se sacó y se lavó con agua para eliminar todo el material del rumen del animal, para posteriormente ser colocada en la estufa a 55°C durante un periodo de 96 horas y registrar el peso obtenido.

3.13 Variables a medir

Para la investigación se establecieron tres periodos de corte en base al número de hojas a partir del rebrote, siendo a las 1.5 – 2.5 – 3.5 hojas dejando un residual de 5 cm desde el suelo.

3.14 Filocrono y número de días por corte

Para obtener la suma térmica se determinó la acumulación de temperatura media diaria, después de la emergencia de las plántulas, sobre una temperatura base (T Base): 5°C durante todo el proceso de crecimiento de las gramíneas forrajeras en cada etapa de corte. Lo utilizado para el cálculo fue la temperatura del aire tomada de termómetros de mercurio ubicados en la estación meteorológica de la Universidad de las Fuerzas Armadas – IASA I, registrando temperatura máxima y mínima del día.

Para el presente trabajo la temperatura acumulada se calculó según lo estipulado por de la siguiente forma:

$$\text{Suma Térmica (GDA)} = [(T_{\text{max}} + T_{\text{min}})/2] - T_{\text{base}}.$$

Donde GDA: grados día acumulado; Tmax: Temperatura máxima del día; Tmin: Temperatura mínima del día; Tbase: Temperatura base (Bartholomew & Williams, 2005).

3.15 Índices de vegetación

Los distintos índices de vegetación se calcularon mediante la utilización del Espectro radiómetro Field Spec Hi Res 4 en los tres tiempos de corte establecidos (1.5 – 2.5 – 3.5 hojas) posterior a un corte de igualación con un residual de 5 cm de altura.

Los datos obtenidos en campo (archivos .asd) fueron descargados, para luego ser procesados en el software ViewSpec Pro. A dichos datos se los promedió para obtener uno solo por cada parcela (repetición); se obtuvieron firmas espectrales agrupadas por tratamiento y por repeticiones. Los datos obtenidos como longitudes de onda en nanómetros (nm), permitirán obtener los índices de vegetación propuestos como se observa en la figura 12.

Wavelength	T1R1	T1R2	T1R3	T2R1	T2R2	T2R3	T3R1	T3R2	T3R3
350	1,52E-02	1,84E-02	9,33E-03	9,76E-03	9,86E-03	1,80E-02	1,71E-02	1,13E-02	1,45E-02
351	1,50E-02	1,85E-02	8,86E-03	9,94E-03	9,47E-03	1,75E-02	1,65E-02	1,12E-02	1,50E-02
352	1,55E-02	1,83E-02	9,20E-03	9,88E-03	9,97E-03	1,81E-02	1,71E-02	1,16E-02	1,54E-02
353	1,57E-02	1,82E-02	9,34E-03	9,63E-03	1,03E-02	1,85E-02	1,75E-02	1,16E-02	1,49E-02
354	1,50E-02	1,81E-02	8,63E-03	9,45E-03	9,72E-03	1,80E-02	1,68E-02	1,09E-02	1,40E-02
355	1,56E-02	1,80E-02	9,22E-03	9,70E-03	1,02E-02	1,85E-02	1,73E-02	1,16E-02	1,48E-02
356	1,59E-02	1,82E-02	9,50E-03	1,01E-02	1,04E-02	1,87E-02	1,75E-02	1,20E-02	1,51E-02
357	1,58E-02	1,85E-02	9,52E-03	1,02E-02	1,04E-02	1,86E-02	1,75E-02	1,19E-02	1,49E-02
358	1,58E-02	1,82E-02	9,79E-03	9,87E-03	1,06E-02	1,88E-02	1,76E-02	1,19E-02	1,51E-02
359	1,55E-02	1,79E-02	9,54E-03	9,75E-03	1,04E-02	1,87E-02	1,73E-02	1,15E-02	1,51E-02
360	1,57E-02	1,79E-02	9,52E-03	9,77E-03	1,06E-02	1,88E-02	1,73E-02	1,16E-02	1,51E-02
361	1,62E-02	1,80E-02	9,76E-03	9,78E-03	1,10E-02	1,91E-02	1,74E-02	1,19E-02	1,53E-02
362	1,60E-02	1,78E-02	9,77E-03	9,63E-03	1,07E-02	1,89E-02	1,73E-02	1,19E-02	1,54E-02
363	1,62E-02	1,79E-02	1,01E-02	9,88E-03	1,11E-02	1,93E-02	1,78E-02	1,21E-02	1,54E-02
364	1,62E-02	1,80E-02	1,03E-02	1,00E-02	1,12E-02	1,95E-02	1,80E-02	1,22E-02	1,54E-02
365	1,61E-02	1,79E-02	1,02E-02	9,90E-03	1,09E-02	1,91E-02	1,76E-02	1,20E-02	1,54E-02
366	1,64E-02	1,79E-02	1,05E-02	1,00E-02	1,15E-02	1,95E-02	1,81E-02	1,23E-02	1,51E-02
367	1,65E-02	1,79E-02	1,06E-02	1,02E-02	1,16E-02	1,95E-02	1,82E-02	1,24E-02	1,54E-02

Figura 12. Longitudes de onda capturadas con espectralradiómetro

3.15.1 Índice de Vegetación de Diferencia Normalizada (NDVI)

Después de obtener la respuesta espectral promedio para cada uno de los tratamientos en estudio; con el uso del programa View Spec Pro TM versión 5.6 se procedió a exportar los datos a un archivo .TXT y posteriormente al cálculo del NDVI mediante la fórmula propuesta por Yates et al (1984).

$$N = \frac{N - R}{N + R}$$

En donde NIR es la banda del Infrarrojo Cercano y Red la banda Roja del sensor. Por otro lado, Sims & Gamon (2002) describen la ecuación para el cálculo del NDVI a partir de la reflectancia como:

$$N = \frac{R_7 - R_7}{R_7 + R_7}$$

Donde R es la reflectancia y cada subíndice es la longitud de onda en nanómetros.

3.15.2 Índice de Vegetación Ajustado al Suelo (SAVI)

Se tomó en cuenta una imagen Sentinel 2B considerando el centro y el ancho de las bandas Rojo, Verde, Azul, NIR y SWIR obtenidas de los metadatos de la imagen, para posteriormente elaborar los intervalos de longitudes de banda, que se muestran en la Tabla 5.

Tabla 5
Características determinadas de Sentinel 2B

Banda	Centro de banda (nm)	Ancho de banda (nm)	Intervalo	
			Min	Max
Banda 2 - Blue	490	130	425	555
Banda 3 - Green	560	100	510	610
Banda 4 - Red	665	90	620	710
Banda 8 – NIR	842	175	754,5	929,5
Banda 11 – SWIR	1610	172	1524	1696

De acuerdo a los valores obtenidos en la respuesta espectral con el uso del programa View Spec Pro TM versión 5.6, se realizó el cálculo del SAVI para cada tratamiento mediante la fórmula propuesta por Huete (1988).

$$S. = \frac{N - R}{N + R + L} (1 + L)$$

3.15.3 Índice del contenido de clorofila

Se realizó el cálculo mediante la fórmula propuesta por Ortega (2015), que se basa en la primera derivada de los datos registrados en la respuesta espectral después de haber obtenido los valores de cada tratamiento con el uso del programa View Spec Pro TM versión 5.6 para posteriormente exportar los datos a un archivo .txt.

$$C = \frac{D_7}{D_7}$$

3.16 Análisis proximal

Se recolectó la biomasa obtenida de pasto en cada etapa de corte (1.5 – 2.5 – 3.5 hojas) en donde se registraron las observaciones con el espectroradiómetro, para posteriormente realizar el análisis proximal de cada tratamiento.

3.16.1 Determinación del contenido proteico

La biomasa obtenida fue sometida a la prueba de Kjeldahl con el objetivo de determinar su contenido proteico, para lo cual se pesaron 3 g de biomasa seca de pasto en papel encerado y se depositaron en un balón con 25 ml de ácido sulfúrico y media tableta de catalizador Kjeldahl.

El balón se colocó en el equipo de digestión con extractor de vapores, programado en potencia 4, por el transcurso de 2 horas, durante las cuales fue necesario girar el balón cada 20 minutos para evitar que su contenido se derrame debido a la ebullición, hasta que el líquido adopte una coloración verde (INEN, Determinación de Proteína, 1981)

Después se colocó en el balón 250 ml de agua destilada, 100 ml de solución concentrada de hidróxido de sodio (500 g/l) y se llevó al destilador Kjeldahl. El proceso concluyó al obtener 250 ml de destilado en un matraz Erlenmeyer con 3 gotas de solución indicadora y 50 ml de ácido bórico al 4% (previamente adicionados).

El destilado fue titulado con una solución de ácido clorhídrico 0,1 N hasta obtener una coloración violeta, anotando el volumen ocupado para obtener este cambio de color. Para la obtención del porcentaje de nitrógeno se utilizó la siguiente fórmula:

$$\%N = (0,014 * VT * N) / PM * 100.$$

Donde:

VT: Volumen ocupado de ácido clorhídrico para la titulación; PM: Peso de la muestra en gramos; N: Normalidad del ácido clorhídrico

Este resultado fue multiplicado por la constante 6,25 para obtener el porcentaje de proteína (INEN, Determinación de Proteína, 1981).



Figura 13. Análisis de proteína - Método Kjeldalh

3.16.2 Determinación del contenido de grasa

Para determinar el porcentaje de grasa se utilizó el método de Soxhlet, para lo cual se pesó 3 g de pasto previamente triturado y ubicado en papel filtro que se colocó en un sifón Soxhlet, conectado a mangueras de entrada y desfogue de agua y a un balón sobre una plancha de calentamiento. Fue necesario colocar 120 ml de acetona en el sifón y calentar el balón a 300°C hasta que se produzcan 3 sifonadas (caída del solvente desde el sifón hacia el balón) (INEN, Determinación de Grasa, 1981). Se realizó la destilación de la acetona del

balón, quedando sólo el contenido lipídico, el cual se pesó en una balanza analítica (se registró previamente el peso del balón limpio y seco antes de iniciar el procedimiento para obtener por diferencia el peso exacto del contenido lipídico). El porcentaje de grasa se determinó mediante la fórmula: $\% \text{ Grasa} = (\text{PL} / \text{PM}) * 100$

Dónde: PL: Peso del contenido lipídico; PM: Peso de la muestra.



Figura 14. Análisis de grasa - Método Soxhlet

3.16.3 Determinación del contenido de fibra

La determinación del contenido de fibra se realizó mediante el método químico gravimétrico, en el cual se pesó 3 g del pasto correspondiente a cada tratamiento que fueron colocados en un matraz Erlenmeyer con 100 ml de ácido clorhídrico 1N (digestión ácida) a una temperatura de 200°C durante 2 horas. Después se añadió 200 ml de agua destilada para concentrar todos los residuos pegados al matraz durante el calentamiento. Esta solución fue filtrada y el residuo se colocó en otro matraz con 100 ml de hidróxido de sodio 1N para ser calentado de nuevo a 200°C durante 2 horas (fermentación básica). Al término de este proceso se colocó 200 ml de agua destilada y se realizó el filtrado de la muestra (FAO, 1997).

El residuo corresponde a la fibra cruda, que fue pesado en una balanza analítica para hacer la relación: $(\text{PF} / \text{PM}) = (\text{X} / 100)$, en donde PF (peso de la fibra), PM (peso de la

muestra), X (valor de fibra a obtener en 100 g de muestra) y así poder determinar el porcentaje de fibra del pasto en estudio (FAO, 1997).



Figura 15. Análisis de fibra - Método químico gravimétrico

3.16.4 Determinación de humedad y cenizas

El contenido de humedad se comprobó mediante la técnica de secado que consistió en colocar en un recipiente 3 gramos de pasto y en una estufa calentarlo a $130 \pm 3^{\circ}\text{C}$ durante 1 hora. El contenido de cenizas se determinó mediante el método de calcinación que consistió en colocar en un crisol 3 g de muestra y someterlo a calcinación en una mufla a $550 \pm 15^{\circ}\text{C}$ hasta obtener cenizas de color gris claro. El peso de los recipientes con las muestras de 3 g de pasto se registró antes y después de los procedimientos para obtener mediante diferencia de pesos el resultado de humedad y cenizas (INEN, Determinación de Humedad y Ceniza, 1981).

Se utilizó un desecador para transportar a la balanza los recipientes desde la mufla y la estufa respectivamente. En ambas determinaciones se utilizó la siguiente fórmula para determinar su porcentaje: $\% \text{ Humedad o Cenizas} = ((P_i - P_f) / P_M) * 100$, en donde P_i (peso del recipiente con la muestra), P_f (peso del recipiente de la muestra tras el proceso de secado o calcinación), P_M (peso de la muestra) (INEN, Determinación de Humedad y Ceniza, 1981).

3.17 Porcentaje de digestibilidad

El porcentaje de digestibilidad se calculó en base al peso de la muestra de pasto con los valores de antes y después de ser sometidos al coctel bacteriano en el estómago de la vaca fistulada durante 24 y 48 horas respectivamente. La muestra debió ser secada para obtener el peso correspondiente de acuerdo a la sección.

Se calculó el porcentaje de digestibilidad mediante la siguiente fórmula:

$$P_{e d d i} = \frac{P_{f i} \times 100}{P_{i n}}$$



Figura 16. Análisis de digestibilidad in situ

CAPÍTULO IV

RESULTADOS Y DISCUSIÓN

Este capítulo expone los resultados derivados de la metodología descrita que abarca lo referente a la recolección de datos en campo, registro de temperatura diaria, radiometría de campo, análisis bromatológico, digestibilidad y su validación por medio de herramientas estadísticas. Para finalmente evidenciar si existe una relación entre los índices de vegetación obtenidos por radiómetro de campo y el porcentaje digestibilidad de rye grass anual y rye grass perenne.

4.1 Variables

Se obtuvo los siguientes resultados de acuerdo a los factores de topografía (plano – inclinado), fertilización (fertilizado – no fertilizado) y variedad de rye grass (anual – perenne), para las variables en estudio.

4.1.1 Filocrono y número de días por corte

De acuerdo a la temperatura diaria registrada se observa en la tabla 7 los grados días acumulados para cada corte (1.5 – 2.5 – 3.5 hojas), en los cuales no se observó interacción entre la frecuencia de defoliación y topografía por lo que se presentan sólo los efectos de los factores principales de acuerdo a las variedades que en ellas sí hubo diferencia respecto al alcanzar la etapa de corte. Se realizó la comparación entre variedades por medio de la prueba de Tukey al 5%, para la variable filocrono en relación al tiempo de corte, obteniendo los siguientes resultados.

Tabla 6

Prueba de Tukey al 5% para el filocrono promedio entre la interacción Variedad vs Corte

RYE GRASS PERENNE					RYE GRASS ANUAL				
Corte	Medias	N	EE		Corte	Medias	N	EE	
1.5	139.56	12	0.46	A	3.5	149.50	12	0.46	A
2.5	151.50	12	0.46	B	1.5	159.75	12	0.46	B
3.5	161.42	12	0.46	C	2.5	167.25	12	0.46	C

Se realizó una prueba de Tukey al 5% para Rye grass Perenne y Rye grass Anual respecto a los grados días acumulados para cada corte. Dentro de cada variedad existen diferencias significativas de acuerdo a grados día acumulados por cada corte, siendo el corte a 3.5 y 2.5 hojas que a partir del segundo corte acumuló mayor temperatura para Rye grass perenne y Rye grass anual respectivamente y por ende la tasa de aparición de una nueva hoja fue mas rápida.

Tabla 7

Prueba de Tukey al 5% para el filocrono promedio entre la interacción Variedad vs Fertilización

Fertilización	Variedad	Medias	n	EE	
Fertilizado	Rye grass Perenne	150.25	18	0.07	A
No Fertilizado	Rye grass Perenne	151.36	18	0.07	A
No Fertilizado	Rye grass Anual	158.83	18	0.07	B
Fertilizado	Rye grass Anual	158.83	18	0.07	B

De acuerdo a la tabla 8, se realizó una prueba de Tukey al 5% para la relación de fertilización y variedad respecto a los grados días acumulados En cuanto a la influencia de la fertilización convencional se observa que no existe diferencia significativa en ninguna de las dos variedades respecto a los grados días acumulados en promedio. Cabe recalcar que la variedad Rye grass anual presenta mayor acumulación de grados días, traduciéndose a un mejor desarrollo foliar despues del corte.

Las condiciones ambientales controlan fuertemente el crecimiento y desarrollo de las plantas, estimulando o frenando sus procesos dentro de un medio abiótico, tales como la luz, la temperatura e incluso la disponibilidad de nutrientes destacan al ser determinantes en los procesos mencionados.

La temperatura es el factor ambiental al cual de manera instantánea las plantas tienden a responder, ya que gradúa la asimilación de nutrientes y la configuración morfogénica con respecto a la estructura que tenga la pastura, ya que esta presenta una relación proporcional con la velocidad del proceso.

La tasa de aparición de hojas en gramíneas, conocido como Filocrono ($^{\circ}\text{C}$ día), depende de la temperatura ambiental, convirtiéndose en un factor predecible para realizar una planificación de oferta de forraje para la alimentación animal, ya que es un parámetro relativamente estable como una característica genotípica.

En el presente estudio para rye grass perenne tuvo en promedio de $150,8267^{\circ}\text{C}$ día y para Rye grass anual de 158.8333°C día, datos que se asemejan a los reportados por varios autores, tal como 110°C día, 140°C día, 120°C día para rye grass perenne (Lemaire, 1985) (Berenton & Carton, 1985) (Davies A. , 1988). Para rye grass anual reportan datos como 168°C día, 114°C día, 160°C día y 149°C día (Hume, 1997) (Gao & Wilman, 1994) (Lattanzi, Marino, & Mazzanti, 1997) (Labreux, 1998).

Con respecto a la fertilización, no tuvo efecto significativo sobre el filocrono en cada variedad de rye grass. Sin embargo, varios autores explican que la aplicación de nitrógeno aceleraría los cambios en la estructura del macollo, como longitud de hoja y tasa de aparición de hojas (Duru & Ducrocq, 2000). De igual forma observaron en estudios que al dar una dosis sumamente baja de nitrógeno, la planta presenta una disminución en la tasa de aparición de

hojas. Esto se explicaría ya que más que la frecuencia de corte y la fertilización nitrogenada, la temperatura afectaría en mayor medida al filocrono (Wilman & Wright, 1983).

Es importante considerar que la frecuencia de corte (1.5 - 2.5 - 3.5 hojas) y la dosis de fertilizante (nitrógeno) no afectaron al filocrono y la tasa de aparición de macollos pero sí registraron un incremento en producción de materia seca y en tasa de elongación foliar (Balocchi, Solis, Poff, Keim, & López, 2011). Cabe recalcar que en el presente estudio la fertilización fue de 10-30-10, con el fin de suplir todos los requerimientos nutricionales que presentaba el suelo respecto a análisis de suelo previamente realizados.

4.1.2 Índices de vegetación

De los muestreos realizados en el ensayo de campo se obtuvo como resultados en base a reflectancia valores de NDVI, CCI y SAVI, según la topografía, fertilización, variedad y corte, mediante la interpretación, análisis y finalmente, gráficas comparativas de estos índices para encontrar su relación entre sí de las firmas espectrales en cada uno de los muestreos.

En la figura 17 se pueden apreciar los valores promedios obtenidos para NDVI, SAVI y CCI, agrupados por tratamientos de acuerdo a sus respectivos factores y los cortes realizados.

TRATAMIENTO	TOPOGRAFÍA	FERTILIZACIÓN	VARIEDAD	CORTE	NDVI	SAVI	CCI
1	PLANO	NO_FERTILIZADA	RYE_GRASS_ANUAL	1	0,337929	0,525571	0,476516
1	PLANO	NO_FERTILIZADA	RYE_GRASS_ANUAL	2	0,479399	0,526516	0,574084
1	PLANO	NO_FERTILIZADA	RYE_GRASS_ANUAL	3	0,534973	0,641440	0,587821
2	PLANO	NO_FERTILIZADA	RYE_GRASS_PERENNE	1	0,320519	0,523584	0,476516
2	PLANO	NO_FERTILIZADA	RYE_GRASS_PERENNE	2	0,447493	0,593513	0,587292
2	PLANO	NO_FERTILIZADA	RYE_GRASS_PERENNE	3	0,534701	0,715509	0,599629
3	PLANO	FERTILIZADA	RYE_GRASS_ANUAL	1	0,443082	0,497755	0,787165
3	PLANO	FERTILIZADA	RYE_GRASS_ANUAL	2	0,564496	0,568071	0,874871
3	PLANO	FERTILIZADA	RYE_GRASS_ANUAL	3	0,626211	0,736284	0,878865
4	PLANO	FERTILIZADA	RYE_GRASS_PERENNE	1	0,493850	0,557676	0,803989
4	PLANO	FERTILIZADA	RYE_GRASS_PERENNE	2	0,642933	0,637334	0,918444
4	PLANO	FERTILIZADA	RYE_GRASS_PERENNE	3	0,665188	0,753684	0,926469
5	PENDIENTE	NO_FERTILIZADA	RYE_GRASS_ANUAL	1	0,264228	0,465130	0,609479
5	PENDIENTE	NO_FERTILIZADA	RYE_GRASS_ANUAL	2	0,362663	0,632611	0,642388
5	PENDIENTE	NO_FERTILIZADA	RYE_GRASS_ANUAL	3	0,522205	0,740927	0,670180
6	PENDIENTE	NO_FERTILIZADA	RYE_GRASS_PERENNE	1	0,264512	0,602812	0,607035
6	PENDIENTE	NO_FERTILIZADA	RYE_GRASS_PERENNE	2	0,375216	0,695551	0,680610
6	PENDIENTE	NO_FERTILIZADA	RYE_GRASS_PERENNE	3	0,495191	0,815751	0,735513
7	PENDIENTE	FERTILIZADA	RYE_GRASS_ANUAL	1	0,359882	0,563920	0,747660
7	PENDIENTE	FERTILIZADA	RYE_GRASS_ANUAL	2	0,503526	0,605885	0,818823
7	PENDIENTE	FERTILIZADA	RYE_GRASS_ANUAL	3	0,584291	0,729108	0,825298
8	PENDIENTE	FERTILIZADA	RYE_GRASS_PERENNE	1	0,416452	0,607592	0,780067
8	PENDIENTE	FERTILIZADA	RYE_GRASS_PERENNE	2	0,483437	0,693311	0,805982
8	PENDIENTE	FERTILIZADA	RYE_GRASS_PERENNE	3	0,535609	0,795708	0,829757

Figura 17. Índices de vegetación por tratamientos obtenidos por radiometría de campo

4.1.3 Normalized Difference Vegetation Index (NDVI)

Del análisis de varianza para el índice NDVI, como se presenta en la Tabla 9, se observa que existen diferencias altamente significativas para fertilización (P-valor = 0.00433), para variedad (P-valor = 0.00466) y para corte (P-valor = 0.0001). De igual forma para la interacción corte vs variedad (P-valor= 0.04841) y fertilización vs corte vs variedad (P-valor =0.04934).

Tabla 8*Análisis de Varianza de NDVI promedio entre factores y su interacción.*

F.V.	SC	gl	CM	F	p-valor
Modelo	0,29	15	0,02	29,86	0,0001
Topografía	0,04	1	0,04	25,87	0,05236
Fertilización	0,08	1	0,08	57,76	0,00433
Fertilización*Topografía	0,0014	1	0,0014	2,13	0,05823
Variedad	0,00035	1	0,00035	250,5	0,00466
Fertilización*Variedad	0,002	1	0,002	1,43	0,07544
Fertilización>Topografía*Variedad	0,002	2	0,0014	2,19	0,05747
Corte	0,16	2	0,05	125,58	0,0001
Fertilización*Corte	0,0035	2	0,0017	2,68	0,06283
Corte*Variedad	0,001	2	0,0051	18,96	0,04841
Fertilización*Corte*Variedad	0,00072	2	0,00036	56,2	0,04934
Error	0,01	8	0,00064		
Total	0,29	23			

Tabla 9*Prueba de Tukey al 5% para NDVI promedio entre la interacción Fertilización vs Variedad vs Corte*

Fertilización	Variedad	Corte	Medias	n	EE	
No fertilizado	Rye grass perenne	1	0.29	2	0.02	A
No fertilizado	Rye grass anual	1	0.30	2	0.02	A B
Fertilizado	Rye grass anual	1	0.40	2	0.02	A B C
No fertilizado	Rye grass perenne	2	0.41	2	0.02	B C
No Fertilizado	Rye grass anual	2	0.42	2	0.02	C D
Fertilizado	Rye grass perenne	1	0.46	2	0.02	C D E
No fertilizado	Rye grass perenne	3	0.51	2	0.02	D E F
No fertilizado	Rye grass anual	3	0.53	2	0.02	D E F
Fertilizado	Rye grass anual	2	0.53	2	0.02	D E F
Fertilizado	Rye grass perenne	2	0.56	2	0.02	E F
Fertilizado	Rye grass perenne	3	0.60	2	0.02	F
Fertilizado	Rye grass anual	3	0.61	2	0.02	F

Tabla 10*Prueba Tukey al 5% para NDVI promedio entre Variedad vs Corte*

Variedad	Corte	Medias	N	EE	
Rye grass anual	1	0.35	4	0.02	A
Rye grass perenne	1	0.37	4	0.02	A
Rye grass anual	2	0.48	4	0.02	B
Rye grass perenne	2	0.49	4	0.02	B
Rye grass perenne	3	0.56	4	0.02	C
Rye grass anual	3	0.57	4	0.02	C

Se realizó una prueba de comparación de Tukey al 5% para la variable NDVI, obteniendo los siguientes resultados reflejados en la tabla 10: Se observa de acuerdo a los análisis en cada corte el diferente comportamiento del NDVI durante el desarrollo del Rye grass tanto anual y perenne, donde el NDVI aumenta de forma progresiva de acuerdo a su desarrollo fenológico, obteniéndose valores más altos en el segundo y tercer corte (2.5 y 3.5 hojas) con valores de NDVI de 0.56 y 0.60 respectivamente para Rye grass perenne y valores de 0.53 y 0.61 para Rye grass anual, bajo un programa de fertilización.

Para realizar la interpretación del índice, cabe recalcar que el NDVI presenta rangos de -1 a +1, en el que los datos correspondientes a vegetación, siendo los valores más altos quienes se relacionan con el vigor de la planta (Gonzaga C. , 2014). De igual forma se reportan valores de vegetación entre 0,2 a 0,8 (Meneses, 2012). Así mismo se utilizó métodos de teledetección espectral, lo que concuerda con los valores obtenidos en el estudio y el comportamiento que presentan de acuerdo a su desarrollo

De la misma forma se puede observar que existe diferencia con respecto al grado de fertilización de Rye grass en cada corte (1.5 – 2.5 – 3.5 hojas). Esto indica que espectralmente se puede diferenciar entre una planta de Rye grass sin fertilizante y una con fertilización (espectralmente); sin embargo, no se puede distinguir entre variedades, ya que no presentan diferencia estadística significativa en cada corte (Paz, 2005).

Comparando las medias de cada variedad se observa un aumento del NDVI de 0.23 y 0.61 de cada corte para Rye grass anual y Rye grass perenne en promedio con respecto a la respuesta de la fertilización; esto debido a que el consumo del nitrógeno, según CARE (2015), está involucrado en los principales procesos de desarrollo de la planta. De igual forma Baghzouz, Devitt & Morris (2014), quienes evalúan de la variabilidad temporal en la respuesta de reflectancia espectral de Rye grass anual a los cambios en las aplicaciones de

nitrógeno, mencionan el uso de NDVI como una herramienta para evaluar el estado de salud general del pasto, con una relación estrecha con el contenido de humedad y de clorofila presente. De igual forma en la tabla 11 se observa una diferencia significativa marcada entre los valores de NDVI en cada corte, lo que se relaciona a los estudios realizados por Lamb, D; Steyn-Ross, M; Schaars, P; Hanna, M; Silvester, W; Steyn-Ross (2002), mencionan que debido a que la absorción de pigmento suele estar muy relacionada con el contenido de agua en las hojas, es factible estimar las propiedades de la vegetación utilizando un par de bandas visibles y NIR.

Índices de vegetación tales como relación simple (RS) e índice de vegetación de diferencia normalizada (NDVI) se han calculado de forma rutinaria a partir de imágenes AVHRR para inferir el verdor, sin embargo, la modelización teórica de las reflectancia del dosel por Sellers (1985) sugiere que, aunque la RS está relacionada aproximadamente de manera lineal con la resistencia mínima del dosel y la capacidad fotosintética, ni NDVI ni SR son buenos indicadores de la cantidad de materia verde medida por el índice de área foliar (LAI) o la biomasa. Es así que se relacionó la materia seca total (en kg / hectárea) con combinaciones lineales de reflectancia verdes, rojas e infrarrojas cercanas de pastos.

4.1.4 Soil Adjusted Vegetation Index (SAVI)

Del análisis de varianza para el índice SAVI, como se presenta en la tabla 12, se observa que existen diferencias altamente significativas para fertilización (P-valor = 0.00380), para variedad (P-valor = 0.0349) y para corte (P-valor = 0.0001). De igual forma para la interacción corte vs variedad (P-valor= 0.0018) y fertilización vs corte vs variedad (P-valor =0.02181).

Tabla 11*Análisis de Varianza de SAVI promedio entre factores y su interacción*

F.V.	SC	Gl	CM	F	p-valor
Modelo	0,21	15	0,01	10,68	0,0001
Topografía	0,02	1	0,02	13,62	0,1685
Fertilización	0,003	1	0,003	62,16	0,0380
Fertilización*Topografía	0,0014	1	0,0014	1 ,05	0,3347
Variedad	0,02	1	0,002	27,15	0,0349
Fertilización*Variedad	0,0002	1	0,00021	24,23	0,0677
Fertilización>Topografía*Variedad	0,0018	2	0,00088	68,15	0,5358
Corte	0,16	2	0,08	61,01	0,0001
Fertilización*Corte	0,00021	2	0,0001	0,08	0,5252
Corte*Variedad	0,00021	2	0,00011	15,48	0,0018
Fertilización*Corte*Variedad	0,00054	2	0,00027	21	0,02181
Error	0,01	8	0,0013		
Total	0,22	23			

El índice de vegetación ajustado al suelo, fue desarrollado como una modificación de NDVI, para corregir la influencia del brillo del suelo cuando la cubierta vegetal que se está midiendo es baja. Mientras menor sea el valor, menor será la cantidad de cobertura vegetal presente, resultados en comparación a los obtenidos por Paz (2005).

Tabla 12*Prueba de Tukey al 5% para SAVI entre la interacción Fertilización vs Variedad vs Corte*

Fertilización	Variedad	Corte	Medias	n	EE				
No fertilizado	Rye grass anual	1	0.50	2	0.02	A			
Fertilizado	Rye grass anual	1	0.52	2	0.02	A B			
No fertilizado	Rye grass perenne	1	0.56	2	0.02	A B C			
No fertilizado	Rye grass anual	2	0.58	2	0.02	A B C			
Fertilizado	Rye grass perenne	1	0.58	2	0.02	A B C D			
Fertilizado	Rye grass anual	2	0.59	2	0.02	A B C D			
No fertilizado	Rye grass perenne	2	0.63	2	0.02	B C D E			
Fertilizado	Rye grass perenne	2	0.67	2	0.02	C D E F			
No fertilizado	Rye grass anual	3	0.69	2	0.02	D E F			
Fertilizado	Rye grass anual	3	0.73	2	0.02	E F			
No fertilizado	Rye grass perenne	3	0.77	2	0.02	F			
Fertilizado	Rye grass perenne	3	0.78	2	0.02	F			

Se observa en la Tabla 13 el comportamiento del SAVI durante el desarrollo del cultivo, mostrando menor cobertura vegetal en la etapa de primer corte (1.5 hojas) y aumenta en 0.08 promedio para el segundo (2.5 hojas) y en 0.12 al tercer corte (3.5 hojas), debido a que va aumentando la densidad de cobertura vegetal, reduciendo la presencia de espacios vacíos que capten la reflectancia producida por el suelo.

Esto se evidencia claramente en los resultados de la prueba de Tukey en la Tabla 14, en donde se observa que los tres cortes analizados se ubican en diferentes rangos; lo cual permite deducir que es posible diferenciar el crecimiento de la planta cuando presenta 1.5 – 2.5 o 3.5 hojas para cada variedad de rye grass mediante datos espectrales, ratificando de esta manera los resultados obtenidos para NDVI.

Tabla 13

Prueba de Tukey al 5% para SAVI promedio entre la interacción Variedad vs Corte

Variedad	Corte	Medias	N	EE	
Rye grass anual	1	0.51	4	0.02	A
Rye grass perenne	1	0.57	4	0.02	A
Rye grass anual	2	0.58	4	0.02	B
Rye grass perenne	2	0.65	4	0.02	B
Rye grass anual	3	0.71	4	0.02	C
Rye grass perenne	3	0.77	4	0.02	C

Al usar este índice, dos coberturas vegetales de igual actividad fotosintética, pero sobre suelos muy diferentes, aparecerán con igual (o muy similar) índice SAVI, a diferencia de lo que puede suceder en el NDVI clásico. Es importante considerar, que si la cobertura de vegetación no es suficientemente densa, los valores medidos de reflectancia, pueden deberse, no sólo a la vegetación, sino también al suelo subyacente (Guamán, 2018).

En el análisis del SAVI se utilizó el valor estándar de 0,5 considerado para densidades de vegetación intermedias con el objeto de aumentar la sensibilidad de la vegetación SAVI aumentando el rango dinámico y reduciendo aún más el efecto de fondo del suelo, al final el resultado sería una mejora de SAVI con una "señal de vegetación" más alta en relación al "ruido del suelo" (Chehbouni, Huete, Kerr, & Sorooshian, 1994). Con respecto a las diferencias presentadas en fertilización, permite deducir que mientras exista la presencia de una previa fertilización, el pasto tiene un mayor desarrollo en cuanto a masa vegetal, comprobado con el aumento del valor de SAVI (de 0.5 a 0.73), mas no se presenta diferencia entre variedades frente a la fertilización.

4.1.5 Chlorophyll Content Index (CCI)

Del análisis de varianza para el índice CCI, como se presenta en la tabla 15, se observa que existen diferencias altamente significativas para fertilización (P-valor = 0.0227), para variedad (P-valor = 0.0399) y para corte (P-valor = 0.0001). De igual forma para la interacción fertilización vs topografía (P-valor = 0.0001), corte vs variedad (P-valor= 0.0018) y fertilización vs corte vs variedad (P-valor =0.0379).

Como se observa en la tabla 16 existe una influencia significativa en la interacción de la fertilización con el contenido de clorofila en las plantas. El pigmento clorofila desempeña un papel importante y esencial en el proceso de fotosíntesis de las plantas, estructurada por átomos de nitrógeno principalmente, entre otros elementos (Allinger, Cava, De Jongh, Johnson, & Lebel, 1971), y por ende existe una estrecha relación entre el contenido de nitrógeno y la clorofila de las plantas, ya que, al incrementarse el nitrógeno, de manera proporcional también aumenta la clorofila hasta cierto grado (Gholizadeh, Amin, Anuar, & Aimrun, 2009).

Tabla 14*Análisis de Varianza de CCI promedio entre factores y su interacción*

F.V.	SC	gl	CM	F	p-valor
Modelo	0,41	15	0,03	54.35	0,0001
Topografía	0,0028	1	0,0028	0.06	0,8413
Fertilización	0,32	1	0,32	72,46	0,0227
Fertilización*Topografía	0,04	1	0,04	87.55	0,0001
Variedad	0,0028	1	0,002	55.19	0,0399
Fertilización*Variedad	0,0014	1	0,0028	47,23	0,0497
Fertilización>Topografía*Variedad	0,0011	2	0,00014	1.07	0,3858
Corte	0,04	2	0,00054	41,01	0,0001
Fertilización*Corte	0,00048	2	0,02	0.85	0,6386
Corte*Variedad	0,00043	2	0,00024	43.01	0,0368
Fertilización*Corte*Variedad	0,00040	2	0,00021	51.05	0,0379
Error	0,004	8	0,0005		
Total	0,22	23			

De acuerdo a los resultados obtenidos mediante la comparación de medias por la prueba de Tukey al 5%, el factor topografía presentó influencia significativa en relación a la fertilización.

Tabla 15*Prueba de Tukey al 5% para CCI promedio entre la interacción Topografía vs Fertilización*

Topografía	Fertilización	Medias	N	EE	
Plano	No fertilizado	0.55	6	0.01	A
Pendiente	No fertilizado	0.66	6	0.01	B
Pendiente	Fertilizado	0.80	6	0.01	C
Plano	Fertilizado	0.86	6	0.01	D

El nitrógeno es un componente clave de la clorofila y, como tal, sus diferentes niveles en cualquier planta dada, generalmente se reflejarán en la concentración de clorofila en las hojas (Donahue, Miller, & Shickluna, 1983), promoviendo de igual manera la generación de paredes celulares más delgadas.

Tabla 16

Prueba de Tukey al 5% para CCI promedio entre la interacción Fertilización vs Variedad vs Corte

Fertilización	Variedad	Corte	Medias	n	EE	
No fertilizado	Rye grass anual	1	0.54	2	0.04	A
No fertilizado	Rye grass perenne	1	0.55	2	0.04	A
No fertilizado	Rye grass anual	2	0.61	2	0.04	A
No fertilizado	Rye grass anual	3	0.63	2	0.04	B
No fertilizado	Rye grass perenne	2	0.63	2	0.04	B
No fertilizado	Rye grass perenne	3	0.66	2	0.04	B
Fertilizado	Rye grass anual	1	0.76	2	0.04	C
Fertilizado	Rye grass perenne	1	0.80	2	0.04	C
Fertilizado	Rye grass anual	2	0.85	2	0.04	D
Fertilizado	Rye grass anual	3	0.86	2	0.04	D
Fertilizado	Rye grass perenne	2	0.86	2	0.04	D
Fertilizado	Rye grass perenne	3	0.87	2	0.04	D

De acuerdo a lo mencionado, se observa un incremento en el índice de clorofila de acuerdo a las variedades fertilizadas y no fertilizadas, y con respecto al desarrollo de la planta en cada corte en el cual refleja el desarrollo fenológico del Rye grass, cuyas medias aumentan progresivamente mientras madura la planta, esto debido al aumento de follaje (partes verdes) y altura de la planta. Así mismo de tiene tendencia a aumentar la concentración de clorofila en tomate mientras se incrementa el contenido de nitrógeno (Rodríguez, 1998); al igual que el nitrógeno retrasa la pérdida de clorofila (Debata & Murty, 1983).

La prueba de Tukey de la Tabla 17 da como resultado diferentes rangos para cada uno de los estados evaluados; lo que significa que mediante el CCI, al igual que con NDVI, se puede diferenciar espectralmente los estados fenológicos del rye grass en cada variedad (anual y perenne), pero en este caso, usando el rango del espectro electromagnético en el que las plantas tienen su curva de sensibilidad a la fotosíntesis, y por ende, donde tiene lugar la acción de la clorofila.

Por otro lado, se debe tomar en cuenta que demasiada absorción de nitrógeno en algunos pastos promueve la acumulación de compuestos nitrogenados, siendo potencialmente tóxicos para el pastoreo de animales. Bajo tales condiciones "desfavorables", los pastos dominados por especies tales como las hierbas perennes (*Lolium perenne*) pueden ser peligrosas para el ganado (Sellers, 2007).

4.1.6 Resultados de la relación entre índices de vegetación

A continuación, se presentan gráficas construidas a partir de los promedios de los índices obtenidos, agrupados por los criterios de fertilización, variedad y corte. Las Figuras 18 y 19 muestran los valores de los índices NDVI, CCI y SAVI promediados para Rye grass anual y Rye grass perenne, analizados en los cortes (1.5 - 2.5 - 3.5 hojas). Como se observa, los tres índices tienen curvas con la misma tendencia, siendo así que a partir del primer corte aumentan progresivamente sus valores en forma proporcional. Tomando en cuenta los índices que se encuentran afectados por la fertilización tienden a ser superiores a aquellas que no lo fueron. Además, se percibe que la curva de CCI se encuentra sobre los otros dos debido a la diferencia de escalas entre los índices: NDVI y SAVI trabajan entre 0 y 1, mientras que CCI se encuentra entre 0,5 y 1; sin embargo, poseen el mismo comportamiento. Es así que se demuestra de una manera visual lo expuesto anteriormente en los resultados individuales

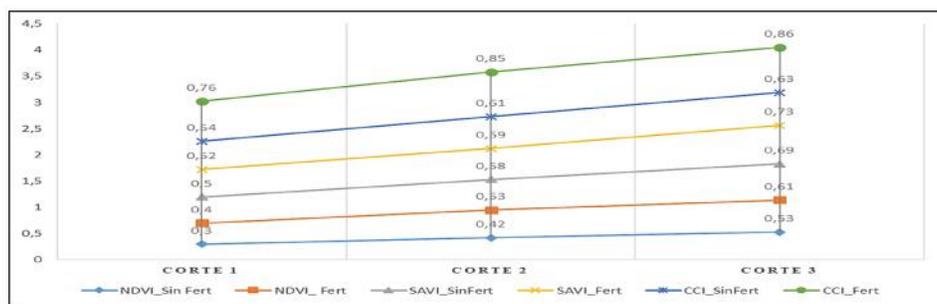


Figura 18. Índices de vegetación vs Fertilización - Rye grass anual

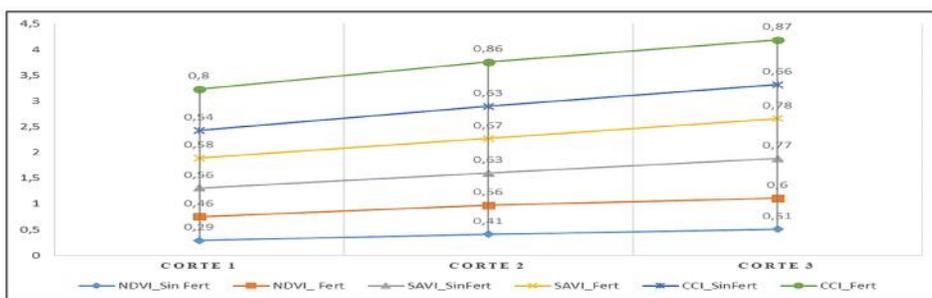


Figura 19. Índices de vegetación vs Fertilización - Rye grass perenne

4.1.7 Digestibilidad in situ

De los muestreos realizados en el ensayo de campo se obtuvieron como resultados en base a la digestibilidad in situ los valores de digestibilidad a las 24 horas, analizados cada uno según topografía, fertilización, variedad y corte con su respectivo análisis. En la figura 20 se pueden apreciar los valores promedios obtenidos de digestibilidad, agrupados por tratamientos de acuerdo a sus respectivos factores y los cortes realizados.

TRATAMIENTO	TOPOGRAFIA	FERTILIZACION	VARIEDAD	CORTE	DIGESTIBILIDAD 24 h
1	PLANO	NO_FERTILIZADA	RYE_GRASS_ANUAL	1	49,10000
1	PLANO	NO_FERTILIZADA	RYE_GRASS_ANUAL	2	54,23667
1	PLANO	NO_FERTILIZADA	RYE_GRASS_ANUAL	3	48,12000
2	PLANO	NO_FERTILIZADA	RYE_GRASS_PERENNE	1	52,56667
2	PLANO	NO_FERTILIZADA	RYE_GRASS_PERENNE	2	51,51667
2	PLANO	NO_FERTILIZADA	RYE_GRASS_PERENNE	3	46,87000
3	PLANO	FERTILIZADA	RYE_GRASS_ANUAL	1	64,47233
3	PLANO	FERTILIZADA	RYE_GRASS_ANUAL	2	68,82233
3	PLANO	FERTILIZADA	RYE_GRASS_ANUAL	3	58,23233
4	PLANO	FERTILIZADA	RYE_GRASS_PERENNE	1	60,83567
4	PLANO	FERTILIZADA	RYE_GRASS_PERENNE	2	63,76900
4	PLANO	FERTILIZADA	RYE_GRASS_PERENNE	3	55,62233
5	PENDIENTE	NO_FERTILIZADA	RYE_GRASS_ANUAL	1	42,22900
5	PENDIENTE	NO_FERTILIZADA	RYE_GRASS_ANUAL	2	46,04900
5	PENDIENTE	NO_FERTILIZADA	RYE_GRASS_ANUAL	3	36,69900
6	PENDIENTE	NO_FERTILIZADA	RYE_GRASS_PERENNE	1	42,06900
6	PENDIENTE	NO_FERTILIZADA	RYE_GRASS_PERENNE	2	52,78900
6	PENDIENTE	NO_FERTILIZADA	RYE_GRASS_PERENNE	3	47,29900
7	PENDIENTE	FERTILIZADA	RYE_GRASS_ANUAL	1	60,04333
7	PENDIENTE	FERTILIZADA	RYE_GRASS_ANUAL	2	62,12000
7	PENDIENTE	FERTILIZADA	RYE_GRASS_ANUAL	3	53,68000
8	PENDIENTE	FERTILIZADA	RYE_GRASS_PERENNE	1	50,78333
8	PENDIENTE	FERTILIZADA	RYE_GRASS_PERENNE	2	57,21333
8	PENDIENTE	FERTILIZADA	RYE_GRASS_PERENNE	3	47,39667

Figura 20. Resultados de porcentaje de digestibilidad in situ a 24 horas

En la producción de rumiantes, la mayor limitante en forrajes se encuentra enfocada la fluctuación en su producción (MS) y calidad de los mismos, lo que se traduce en respuesta para obtener mayores índices de producción de leche y crecimiento, reflejándose en su consumo y digestibilidad, los mismos que son afectados principalmente por el manejo de la pradera, como la intensidad, la frecuencia y oportunidad de uso de los mismos (Hernández, Tapia, & Buller, 1956). De igual forma la frecuencia de defoliación en el pasto depende de la cantidad y tipo de tejido removido y acumulado, de su estado fenológico y condiciones meteorológicas (temperatura) al momento del corte; además, el efecto de la intensidad y frecuencia de corte en la tasa de crecimiento del forraje, y su acumulación, dependen de la duración del rebrote y acumulación de carbohidratos necesarios, por tal motivo las características de la planta se evalúa frente al porcentaje de digestibilidad aprovechado para alimentación animal (Rodríguez, 1998).

La influencia de la fertilidad juega de igual manera un papel muy importante ya que demuestra que las muestras de pasto que no fueron fertilizadas demostraron tener un menor índice de digestibilidad, debido a la influencia en la producción de estructuras del nitrógeno especialmente. Cabe recalcar que la fertilización previamente aplicada fue una combinación de 10-30-10, más no netamente nitrogenada.

Se realizó un análisis de varianza para el porcentaje de digestibilidad, como se presenta en la tabla 18, en el cual se observa que existen diferencias altamente significativas para topografía (P-valor = 0.0440), para fertilización (P-valor = 0.0250) y para corte (P-valor = 0.0010). De igual forma para la interacción fertilización vs corte vs topografía (P-valor = 0.0319).

Tabla 17

Análisis de Varianza para Digestibilidad a 24 horas promedio entre factores y su interacción

F.V.	SC	Gl	CM	F	p-valor
Modelo	1390.20	15	92.68	13.92	0,0004
Topografía	239.36	1	239.36	209.11	0,0440
Fertilización	742.00	1	742.00	648.24	0,0250
Fertilización*Topografía	1.14	1	1.14	0.17	0,6894
Variedad	9.97	1	9.47	0.57	0,5280
Fertilización*Variedad	97.71	1	97.71	5.92	0,1355
Fertilización>Topografía*Variedad	33.04	2	16.52	2.48	0,1452
Corte	245.71	2	122.85	18.45	0,0010
Fertilización*Corte	14.17	2	7.09	45.06	0,0483
Corte*Variedad	6.47	2	3.23	0.49	0,6325
Fertilización*Corte*Variedad	1.14	2	0,57	546.9	0,0319
Error	53.28	8	6.66		
Total	1443.48	23			

Se realizó la prueba de comparación de medias de Tukey al 5% para determinar las diferencias significativas entre los porcentajes de digestibilidad realizados a las 24 horas, cuyos resultados se muestran a continuación:

Tabla 18

Prueba de Tukey al 5% para Digestibilidad a 24 horas promedio entre la interacción Topografía vs Fertilización vs Variedad vs Corte

Topografía	Fertilización	Variedad	Corte	Medias	n	E.E.
Pendiente	No fertilizado	Rye grass anual	3	40,33	1	2,02 A
Pendiente	No fertilizado	Rye grass perenne	3	40,72	1	2,02 A
Pendiente	No fertilizado	Rye grass perenne	1	42,55	1	2,02 A
Plano	No fertilizado	Rye grass perenne	3	45,39	1	2,02 A
Pendiente	No fertilizado	Rye grass anual	1	45,54	1	2,02 A
Pendiente	No fertilizado	Rye grass perenne	2	47,76	1	2,02 A
Plano	No fertilizado	Rye grass anual	3	48,29	1	2,02 A
Pendiente	No fertilizado	Rye grass anual	2	48,93	1	2,02 A
Plano	No fertilizado	Rye grass anual	1	50,12	1	2,02 A
Pendiente	Fertilizado	Rye grass perenne	3	50,19	1	2,02 A
Plano	No fertilizado	Rye grass perenne	1	50,6	1	2,02 A
Pendiente	Fertilizado	Rye grass anual	3	53,09	1	2,02 B

CONTINÚA



Plano	No fertilizado	Rye grass perenne	2	53,99	1	2,02	B
Pendiente	Fertilizado	Rye grass anual	1	54,92	1	2,02	B
Plano	No fertilizado	Rye grass anual	2	55,34	1	2,02	B
Pendiente	Fertilizado	Rye grass perenne	1	55,41	1	2,02	B
Plano	Fertilizado	Rye grass anual	3	57,76	1	2,02	B
Plano	Fertilizado	Rye grass perenne	3	58,15	1	2,02	B
Pendiente	Fertilizado	Rye grass perenne	2	58,79	1	2,02	B
Plano	Fertilizado	Rye grass perenne	1	59,98	1	2,02	B
Pendiente	Fertilizado	Rye grass anual	2	60,14	1	2,02	B
Plano	Fertilizado	Rye grass anual	1	62,98	1	2,02	B
Plano	Fertilizado	Rye grass perenne	2	65,2	1	2,02	C
Plano	Fertilizado	Rye grass anual	2	66,36	1	2,02	C

La prueba de Tukey de la Tabla 19 da como resultado diferentes rangos para cada uno de los cortes evaluados en relación al tratamiento con respecto al porcentaje de digestibilidad de materia seca a las 24 horas. Se puede apreciar que los menores porcentajes de digestibilidad se presentan en el tercer corte, bajo un sistema de topografía en pendiente y sin fertilización para las dos variedades, caso contrario si se mantiene el pasto con fertilización y en topografía plana se presenta un mayor promedio en el segundo corte de 65.2 % y 62.98% para rye grass perenne y anual respectivamente durante las 24 horas, ya que influye en gran medida la lixiviación y el arrastre de materia orgánica en sitios con pendiente, afectando considerablemente el desarrollo normal del pasto y la acumulación de fibra en cada corte. De igual forma para los forrajes la edad de las plantas y la composición química de los mismos influyen en la digestibilidad, por ende se realizó un análisis bromatológico para cada uno de los tratamientos en sus respectivos cortes (Reinoso & Guartambel, 2018). Estos análisis comprenden: proteína, grasa, fibra, humedad y ceniza. Todos los análisis se realizaron en base seca. Así mismo se puede apreciar que no existe diferencia significativa entre variedades, aunque rye grass perenne presenta mayores porcentajes de digestibilidad en cada uno de sus cortes en relación a rye grass anual.

Para tener una idea más clara acerca del contenido nutricional que presentó cada tratamiento, se realizó un análisis bromatológico, respecto al contenido de proteína, grasa, fibra humedad y ceniza, haciendo referencia a que los mejores resultados de digestibilidad van de la mano al contenido nutricional de los mismo, manteniendo una relación directa, como se muestra en la figura 21, en la cual se puede apreciar que con respecto al porcentaje de materia seca y proteína, la fertilización influyó en que presenten valores más altos, en comparación a los tratamientos no fertilizados.

De igual forma se corrobora lo mencionado anteriormente con respecto a la pendiente, ya que los tratamientos expuesto en ese tipo de topografía a pesar de ser fertilizados o no, presentan valores más bajos en relación a los que se encuentran en una superficie plana. Referente a las variedades, Rye grass anual supera en contenido de materia seca a Rye grass perenne, no obstante, este último presenta valores más altos de proteína, grasa y fibra, valores semejantes a los presentados por Reinoso & Guartambel (2018) en 8 haciendas cuyos análisis reportaron superiores características nutricionales de Rye grass perenne en relación a Rye grass anual.

TRATAMIENTO	TOPOGRAFIA	FERTILIZACION	VARIEDAD	CORTE	MS	PROTEINA	GRASA	FIBRA	HUMEDAD	CENIZA
1	PLANO	NO FERTILIZADA	RYE_GRASS_ANUAL	1	15,740	12,777	3,551	14,833	3,447	11,890
1	PLANO	NO FERTILIZADA	RYE_GRASS_ANUAL	2	17,560	14,523	3,457	17,967	3,083	11,370
1	PLANO	NO FERTILIZADA	RYE_GRASS_ANUAL	3	21,710	13,060	4,520	20,400	4,993	11,410
2	PLANO	NO FERTILIZADA	RYE_GRASS_PERENNE	1	15,850	12,871	3,387	14,930	3,077	11,680
2	PLANO	NO FERTILIZADA	RYE_GRASS_PERENNE	2	16,730	15,317	3,570	16,810	5,663	12,733
2	PLANO	NO FERTILIZADA	RYE_GRASS_PERENNE	3	19,240	14,764	4,033	19,000	6,317	9,290
3	PLANO	FERTILIZADA	RYE_GRASS_ANUAL	1	17,560	15,257	6,041	17,723	8,553	13,087
3	PLANO	FERTILIZADA	RYE_GRASS_ANUAL	2	19,050	19,560	4,570	20,233	7,177	11,807
3	PLANO	FERTILIZADA	RYE_GRASS_ANUAL	3	21,480	18,543	5,577	24,863	6,837	12,753
4	PLANO	FERTILIZADA	RYE_GRASS_PERENNE	1	17,020	17,477	4,597	16,733	7,503	14,630
4	PLANO	FERTILIZADA	RYE_GRASS_PERENNE	2	18,230	20,077	5,190	20,107	8,520	14,497
4	PLANO	FERTILIZADA	RYE_GRASS_PERENNE	3	20,120	19,290	4,967	22,633	6,417	13,503
5	PENDIENTE	NO FERTILIZADA	RYE_GRASS_ANUAL	1	14,2153	9,513	2,347	15,120	5,353	11,807
5	PENDIENTE	NO FERTILIZADA	RYE_GRASS_ANUAL	2	16,5353	13,457	3,563	17,333	12,317	10,120
5	PENDIENTE	NO FERTILIZADA	RYE_GRASS_ANUAL	3	20,6053	10,761	3,571	18,257	12,551	10,240
6	PENDIENTE	NO FERTILIZADA	RYE_GRASS_PERENNE	1	14,6253	11,997	2,323	14,867	10,567	11,950
6	PENDIENTE	NO FERTILIZADA	RYE_GRASS_PERENNE	2	15,7053	16,333	2,783	15,737	13,380	11,143
6	PENDIENTE	NO FERTILIZADA	RYE_GRASS_PERENNE	3	18,2153	15,797	3,020	16,243	14,380	8,483
7	PENDIENTE	FERTILIZADA	RYE_GRASS_ANUAL	1	16,5353	13,517	4,173	16,930	11,377	10,413
7	PENDIENTE	FERTILIZADA	RYE_GRASS_ANUAL	2	18,0253	16,563	3,300	19,257	8,730	10,463
7	PENDIENTE	FERTILIZADA	RYE_GRASS_ANUAL	3	20,4553	16,393	4,307	21,613	11,310	10,203
8	PENDIENTE	FERTILIZADA	RYE_GRASS_PERENNE	1	15,8953	14,817	4,097	16,663	7,880	13,220
8	PENDIENTE	FERTILIZADA	RYE_GRASS_PERENNE	2	17,2053	17,157	4,117	17,387	9,387	11,913
8	PENDIENTE	FERTILIZADA	RYE_GRASS_PERENNE	3	19,0953	15,157	3,330	19,237	11,143	12,340

Figura 21. Resultados análisis bromatológicos en porcentaje (%) por tratamientos.

4.1.8 Resultados de la relación entre NDVI vs Digestibilidad

A continuación, se presenta una gráfica construida a partir de los promedios de NDVI con fertilización y sin fertilización para Rye grass perenne y Rye grass anual respectivamente en relación al porcentaje de digestibilidad durante los tres cortes realizados (1.5 – 2.5 – 3.5 hojas). Para realizar el análisis de esta relación, el índice NDVI fue transformado en porcentaje para adaptar a un mismo formato numérico.

En apartados anteriores, estaba claro que existía una diferencia marcada entre los índices de vegetación y el porcentaje de digestibilidad de manera individual, con sus debidas interacciones con respecto a la fertilización y el corte, mientras que de manera combinada se puede observar una tendencia de que el mayor porcentaje de digestibilidad se encuentra relacionado a un valor del NDVI, es decir que mediante el uso de radiometría de campo se pueden estimar los valores más altos de digestibilidad (relacionados valores de MS, proteína, grasa, fibra, humedad y ceniza) en relación a los índices de vegetación obtenidos, en especial con NDVI quien va relacionado con el vigor de la planta.

La topografía no fue considerada en estos análisis debido a que en resultados anteriores no presentaron diferencias significativas con respecto a los valores de los índices de vegetación calculados. En la figura 22 se puede apreciar que para Rye grass perenne los valores más altos de digestibilidad se presentan en el segundo corte con 61,44% con fertilización y 50.57% sin fertilización, cuyos valores se encuentran relacionados al del NDVI de 0.56 y 0.41. De igual forma en la figura 23 para Rye grass anual presenta valores de 60.73% con fertilización y 52.36% sin fertilización con NDVI de 0.53 y 0.42.

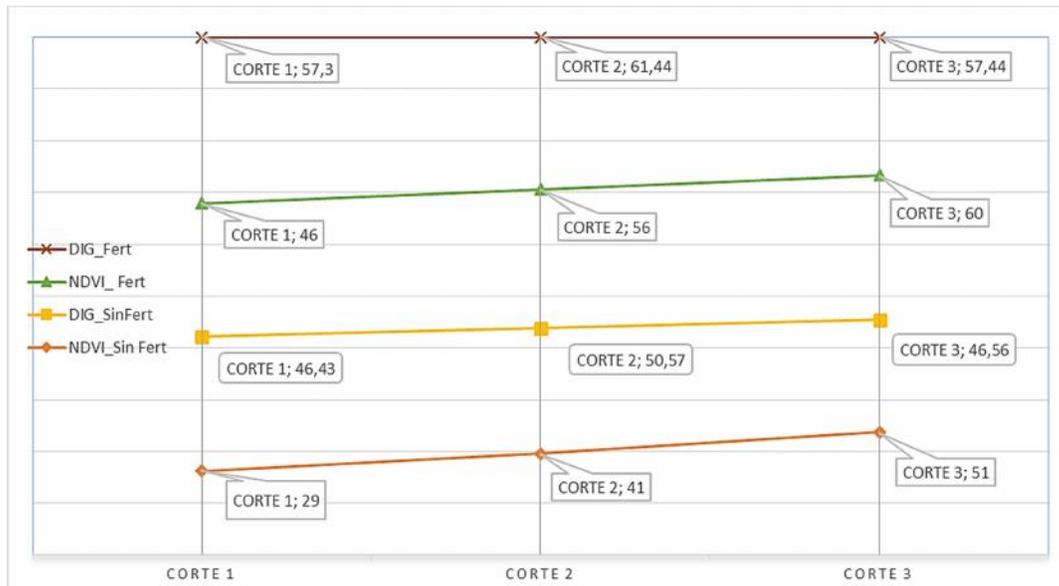


Figura 22. NDVI vs Digestibilidad – Rye grass perenne

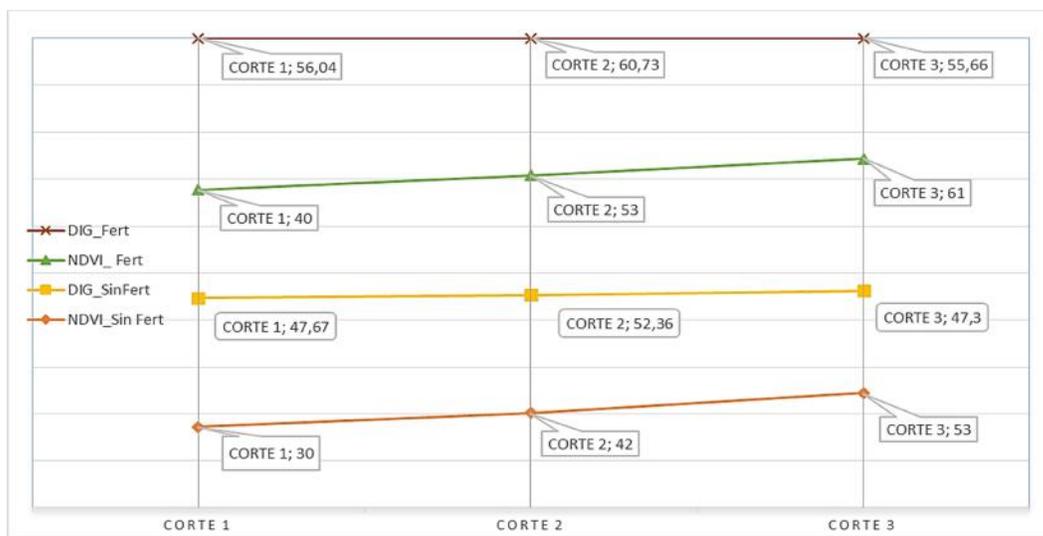


Figura 23. NDVI vs Digestibilidad - Rye grass anual

La detección remota espectral de la vegetación verde ofrece una oportunidad para evaluar las propiedades biofísicas y bioquímicas. Esta técnica podría desempeñar un papel crucial en el manejo de los pastos al proporcionar los medios para evaluar la calidad de los pastos in situ. En este estudio, el potencial del espectro radiómetro de campo para predecir la calidad del pasto estableció una relación positiva y altamente predictiva dirigiéndose hacia la aplicación en imágenes satelitales a mayor escala productiva con respecto a pastos para consumo animal.

CAPÍTULO V

CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES

5.1 Conclusiones

-) La tasa de aparición de hojas en gramíneas, conocido como Filocrono ($^{\circ}\text{C}$ día), depende de la temperatura ambiental, convirtiéndose en un factor predecible para realizar una planificación de oferta de forraje, es así que para Rye grass perenne y Rye grass anual presentaron en promedio 150 y 158 grados día acumulados respectivamente por corte para la generación de una nueva hoja, siendo más notorio en el segundo y tercer corte (2.5 y 3.5 hojas). De igual forma la fertilización y topografía del terreno no influyeron en la velocidad de generación de una nueva hoja, más bien en el incremento de follaje (longitud) y porcentaje de materia seca.
-) Se determinaron los valores de los respectivos índices de vegetación de los cuales no hubo interacción con respecto a topografía (plano y pendiente) para NDVI y SAVI, pero si hubo influencia en relación a CCI presentando valores más altos en pendiente. Referente a la fertilización (fertilizado y no fertilizado), variedad (Rye grass anual y Rye grass perenne) y corte de defoliación (1.5 – 2.5 – 3.5 hojas) hubo diferencia significativa en sus interacciones para NDVI, SAVI y CCI observándose un aumento de los índices de forma progresiva al desarrollo fenológico de los pastos, reducción de espacios vacíos y aumento de densidad, siendo más pronunciada la diferencia en pastos que fueron previamente fertilizados. De igual forma existe una relación entre los tres índices, que poseen el mismo comportamiento frente a los factores expuestos lo cual permite mediante espectroradiometría diferenciar las distintas etapas de defoliación.

- J) Se establecieron los valores de digestibilidad in situ a 24 horas lo cuales presentaron diferencias significativas en las interacciones de topografía (plano y pendiente), fertilización (fertilizado y no fertilizado) y corte (1.5 - 2.5 - 3.5 hojas), siendo evidente un pico de digestibilidad en el segundo corte (2.5 hojas) con el 70 % en promedio. De igual forma la influencia de la fertilidad y la topografía plana se hacen evidentes al presentar valores superiores durante todo el desarrollo fenológico de la planta. Con respecto a las variedades, tanto para Rye grass anual y Rye grass perenne no presentaron diferencias significativas en cada corte, a pesar de que la última presentó valores más altos.
- J) Se relacionó los valores promedios de NDVI para Rye grass perenne y Rye grass anual fertilizado y no fertilizado con respecto a los porcentajes de digestibilidad mediante el cual se concluye que mediante el uso de radiometría de campo se puede establecer relaciones directas de índices de vegetación y el contenido nutricional de los pastos, ya que valores de NDVI que responden al vigor de la planta, cuyo promedio de 0.56 y 0.53 se relaciona al valor más alto de digestibilidad de 60.73% y 61.44% bajo factores de fertilización para rye grass perenne y anual respectivamente. A la vez mediante el análisis bromatológico los valores más altos de digestibilidad muestran mejor contenido de proteína, grasa y fibra. Esto permite realizar una evaluación de la calidad de los pastos mediante estimaciones de índices de vegetación para una planificación más eficiente y menos destructiva al determinar el momento ideal de realizar la pastura.

5.2 Recomendaciones

- J) Para estudios de agricultura de precisión, se recomienda utilizar además otros índices de vegetación que complementen la investigación, como: TSAVI, NSII, RVI, TVI, entre otros.

- J Extender el estudio hacia otras zonas de estudio, estableciendo diferencias cuando hay mayor o menor pluviosidad, altitud, temperatura y la utilización de diferentes variedades de pasto bajo sistemas de fertilización nitrogenada.
- J Dados los resultados encontrados mediante métodos espectrales, es recomendable continuarlos y extenderlos hacia otros cultivos de interés nacional enfocados a la alimentación animal.
- J Se recomienda el seguimiento de investigaciones como la presente, que demuestren el potencial del uso de la radiometría en diversos campos de la ciencia para que puedan ser aplicados en situaciones de interés nacional.

5.3 Bibliografía

- A., B. M., & Chilbroste, P. (2001). Simulación de la digestión ruminal por el método de la producción de gas. *Arch. Latinoamerica*, 43-51.
- Agnusdei, M. M. (1997). Análisis del crecimiento invernal de gramíneas de los pastizales de la Pampa Deprimida (Argentina). *Revista Argentina de Producción Animal*, 162-163.
- Allinger, N., Cava, M., De Jongh, D., Johnson, C., & Lebel, N. S. (1971). *Química Orgánica*. España.
- Alonso, C., Moreno, V., & Rodríguez, E. (1999). Determinación experimental de la firma espectral de la vegetación, una sencilla práctica de introducción a la teledetección. *Teledetección. Avances y aplicaciones*, 429-432.
- ApogeeInstruments. (2016). www.apogeeinstruments.com. Retrieved from www.apogeeinstruments.com/content/ccm-200manual.pdf
- Arbelo, M. (2015). *Marbelo.webs*. Retrieved from www.marbelo.webs.iii.es/Rs2.pdf
- Arbitto, N. (2011). *Evaluación de la producción de pastos mediante la siembra de ray grass inglés y trébol rojo en un predio establecido de kikuyo, en suelos con pendiente de riesgo, comparado con la aplicación de abono de gallina y yaramila, En el Cantón Guachapala*. Cuenca: Universidad Politécnica Salesiana .
- Baghzouz, M., Devitt, D., & Morris, R. (2014). *Evaluating temporal variability in the spectral reflectance response of annual ryegrass to changes in nitrogen applications and leaching fractions*. England.
- Balocchi, L., Solis, O., Poff, A., Keim, S., & López, C. (2011). *Filocrono en una pradera de Lolium perenne L: Efecto de la frecuencia de defoliación y fertilización nitrogenada*. Chile: Universidad Austral de Chile.
- Bartholomew, P., & Williams, R. (2005). Bartholomew, Cool-Season grass development response to accumulated temperature under a range of temperature regimes. *Crop Science*, 529 - 534.
- Benítez, R. (1980). *Pastos y Forrajes*. Quito - Ecuador: Editorial Universitaria.
- Berenton, A., & Carton, O. O. (1985). Tissue turnover in perennial ryegrass (*Lolium perenne*) during winter. *Irish Journal*, 49-62.
- Bernal, J. (2005). *Manual de manejo de pastos cultivados para las zonas alto andinas*. Perú: Promoción Agraria.
- Briske, D. (1991). *Development morphology and physiology of grasses. in: grazing management and ecological perspective*. . EEUU: Timber Press.
- Cabalceta, G. (1999). *Fertilización y nutrición de forrajes de altura*. Costa Rica: Congreso Nacional de Suelos.
- CARE. (2015). www.care.org.pe. Retrieved from <http://www.care.org.pe/wp-content/uploads/2015/06/Manual-de-Fertilizacion-de-La-Quinoa.pdf>

- Casanova, V. (2011). *Vega00.com*. Retrieved from [De Http://Vega00.Com/2011/02/Articulo-De-Veronica-Casanova-Ondas.Html/](http://Vega00.Com/2011/02/Articulo-De-Veronica-Casanova-Ondas.Html/)
- Castellanos, J. (2015). *Guía para la interpretación del análisis de suelo y agua*. Retrieved from INTAGRI: http://fec-chiapas.com.mx/sistema/biblioteca_digital/guia-de-interpretacion-de-analisis-de-suelos-y-aguas-intagri-3.pdf
- Castellanos, V. (2009). *Evaluación morfoagronómica y nutricional de cinco variedades de rye grass bianual (Lolium multiflorum) en lugares representativos de las zonas de producción de lechuga de las provincias de Carchi, Imbabura y Pichincha*. Quito: Escuela Politécnica Nacional.
- Castro, P., Fernández, B., & Valladares, J. (2010). ANÁLISIS DE PASTOS MEDIANTE NIRS. *Producciones agroganaderas: Gestión eficiente y conservación del medio natural*, 73-80.
- Cenicaña. (2015). www.cenicana.org/. Retrieved from [Http://Www.Cenicana.Org/Web/Programas-De-Investigacion/Agronomia/Geomatica/Agricultura-De-Precision](http://www.cenicana.org/web/programas-de-investigacion/agronomia/geomatica/agricultura-de-precision)
- Chapman, D., & Lemaire, G. (1993). Morphogenetic and structural determinants of plant regrowth after defoliation. *XVII International Grasslands Congress*, 95-104.
- Chebouni, J., Huete, A., Kerr, H., & Sorooshian, S. (1994). A Modified Soil Adjusted Vegetation Index . *Remote sens.*, 119-126.
- Chuvieco, E. (2008). *Teledetección ambiental. La observación de la tierra desde el espacio*. España: Ariel Ciencais.
- Collahuazo, G. (2014). *Necesidades hídricas de pasturas con manejo convencional en la zona de influencia del canal de riego Cayambe-Pedro Moncayo*. Quito: Universidad Politécnica Salesiana.
- Davies, A. (1974). Leaf tissue remaining after cutting and regrowth in perennial ryegrass. *Journal of Agricultural Science*, 165-172.
- Davies, A. (1988). *The Regrowth of grass swards*. New Zeland: The Grass Crop.
- Debata, A., & Murty, K. (1983). Effect of foliar application of nitrogen, phosphorus and potassium salts on flag leaf senescence in rice. *Agricultural Science Digest*, 23-26.
- Debata, A., & Murty, K. (1983). *Endogenous ethylene content in rice leaves during senescence*. India: Plant Physiol.
- Donahue, R., Miller, R., & Shickluna, J. (1983). *Soils: An Introduction to Soils and Plant Growth*. New Jersey: Englewood Cliffs.
- Duru, M., & Ducrocq, H. (2000). Growth and Senescence of the Successive Leaves on a Cocksfoot Tiller. Effect of Nitrogen and Cutting Regime. *Annals o Botany*, 645 - 653.
- FAO. (1997). www.fao.org. Retrieved from [Http://Www.Fao.Org/Docrep/010/Ah833s/Ah833s00.Htm](http://www.fao.org/docrep/010/Ah833s/Ah833s00.htm)
- FAO. (2015). <http://www.fao.org/>. Retrieved from <http://www.fao.org/3/a-i4910s.pdf>

- FAO. (2017). www.fao.org. Retrieved from <http://www.fao.org/resources/infographics/infographics-details/es/c/174210/>
- Fillat, F., & García, R. (2008). *Pastos del Perineo*. España: España.
- Gao, Y., & Wilman, D. (1994). Leaf development in eight related grasses. . *Journal of Agricultural*, 41-46.
- Gholizadeh, A., Amin, M., Anuar, A., & Aimrun, W. (2009). Evaluation of Leaf Total Nitrogen Content for Nitrogen Management in a Malaysian Paddy Field by Using Soil Plant Analysis Development Chlorophyll Meter. *American Journal of Agricultural and Biological Sciences*, 278-282.
- Giraldo, L. (2007). *Comparación de dos técnicas in vitro e in situ para estimar la digestibilidad verdadera en varios forrajes tropicales*. Colombia: Revista Colombiana de Ciencias Pecuarias.
- Gómez, M. (2004). *Índice de vegetación en áreas del bosque seco del noroeste del Perú a partir de imágenes satelitales*. . Perú: Universidad de Piura.
- Gonzaga, C. (2014). *Aplicación de índices de vegetación derivados de imágenes satelitales Landsat 7 Etm+ y Aster para la caracterización de la cobertura vegetal en la zona Centro de la provincia de Loja*. Argentina: Universidad Nacional de la Plata.
- Gonzaga, C. (2014). Aplicación de Índices de Vegetación Derivados de Imágenes Satelitales para análisis de Coberturas Vegetales en la Provincia de Loja, Ecuador. *CEDEMAZ*, 30-41.
- Grossi, H. (2014). www.scielo.org. Retrieved from [Http://www.Scielo.Org.Ar/Pdf/Meteoro/V29n1-2/V29n1-2a03.Pdf](http://www.scielo.org/Ar/Pdf/Meteoro/V29n1-2/V29n1-2a03.Pdf)
- Gualavisí, A. (2013). *Determinación del valor nutritivo del rye grass perenne destinado a la alimentación del ganado vacuno mediante la correlación entre grados brix y digestibilidad*. Cayambe-Ecuador. . Quito: Universidad Politécnica Salesiana.
- Guamán, A. (2018). *Monitoreo de maíz duro mediante índices de vegetación obtenidos por imágenes satelitales en Loja y Manabí*. Quito: Universidad Central del Ecuador.
- Hacker, J. (1981). *Nutritional limits to animal production. proc. int symp.* Queenslan, Australia: St. Lucia.
- Hernández, J., & Montaner, D. (2009). *Patrones de respuesta espectral*. Chile: Laboratorio de Geomática y Ecología del Paisaje.
- Hernández, J., & Montaner, D. (2009). *Patrones de Respuesta Espectral*. Chile: Laboratorio de Geomática y Ecología del Paisaje.
- Hernández, X., Tapia, J., & Buller, R. (1956). Los pastizales del noroeste. *Agritécnica*, México.
- Huete, A. (1988). A soil-adjusted vegetation index (savi). remote sensing of environment,. *Researchgate*, 295-309.
- Hume, I. (1997). Leaf and tiller production o prairie grass (*Bromus willdenowii* Kunth) and two ryegrass (*Lolium*) species. *Annals of Botany*, 111-121.

- INEN. (1981). *Determinación de Grasa*. Retrieved from Law.Resource.Org/Pub/Ec/Ibr/Ec.Nte.0523.1981.Pdf
- INEN. (1981). *Determinación de Proteína*. Retrieved from <https://Law.Resource.Org/Pub/Ec/Ibr/Ec.Nte.0518.1981.Pdf>
- INEN. (1981). *Determinación de Humedad y Ceniza*. Retrieved from Law.Resource.Org/Pub/Ec/Ibr/Ec.Nte.0543.1981.Pdf
- INIAP. (2015). *Boletín de guía de manejo de pastos para la Sierra Ecuatoriana*. Cuenca: Iniap.
- Instruments, A. (2016). *Chlorophyll content meter ccm-200 plus manual*. Retrieved from ApogeeInstruments.com: www.ApogeeInstruments.com/Content/Ccm-200manual
- Karszenbaum, H., & Barraza, V. (2000). *Introducción a la teledetección cualitativa*. Argentina: CONICET.
- Kemal Sönmez, N., Emekli, Y., Sari, M., & Bastug, R. (2008). Relationship between spectral reflectance and water stress conditions of Bermuda grass (*Cynodon dactylon* L.). *New Zealand Journal of Agricultural Research*, 51, 223-263. Retrieved from New Zealand Journal of Agricultural Research.
- KhanAcademy. (2017). <https://es.khanacademy.org>. Retrieved from <https://Es.Khanacademy.Org/Science/Biology/Photosynthesis-In-Plants/The-Light-Dependent-Reactions-Of-Photosynthesis/A/Light-And-Photosynthetic-Pigments>
- Knoblauch, C., Watson, C., Berendonk, C., Becker, R., Wrage-Mönnig, N., & Wichern, F. (2017). *Relationship between Remote Sensing Data, Plant Biomass and Soil Nitrogen Dynamics in Intensively Managed Grasslands under Controlled Conditions*. Japón: University of Applied Sciences.
- Labreveux, M. (1998). *Morfogénesis de ocho especies forrajeras de la pampa Húmeda Argentina*. Argentina: UNMdP.
- Lamb, D., Steyn-Ross, M., Schaars, P., Hanna, M., Silvester, W., & Steyn-Ross, A. (2002). Estimating leaf nitrogen concentration in ryegrass (*Lolium* spp.) pasture using the chlorophyll red-edge: theoretical modelling and experimental observations. *Remote sensing*, 3619 - 3648.
- Larios, J. (1982). *Agricultura en zonas afectadas por canícula interintestinal*. El Salvador: El Salvador.
- Lattanzi, F., Marino, M., & Mazzanti, A. (1997). Lattan Fertilizer nitrogen and morphogenetic responses in Avena sativa and Lolium multiflorum. *XVIII International Grassland Congress*, 125-132.
- Lemaire, G. (1985). *Cinétique de croissance de un peuplement de festuca pedant*. Caen: Universidad de Caen.
- Luque, J. (2017). *El espectro electromagnético y radiométrico*. Retrieved 07 02, 2018, from https://www.acta.es/medios/articulos/ciencias_y_tecnologia/062017.pdf
- Meneses, C. (2012). El índice normalizado diferencial de la vegetación como indicador de la degradación del bosque. *Revista Internacional de Silvicultura*, 39-46.

- Olate, K. (2010). Dinámica de crecimiento y calidad nutritiva de una pradera de *lolium perenne* L. sometida a diferentes frecuencias de defoliación: Periodo Primavera-Verano. *AGROSUR*.
- Ortega, C. (2015). *Respuesta espectral del cultivo de arroz (oriza sativa L.) en dos fases fenológicas durante el periodo invernal 2014*. Quito: Universidad Central del Ecuador.
- Padilla, G. (2017). *Estimación de la productividad primaria neta aérea (PPNA) del forraje de pastos para los sistemas de producción ganadera mediante sensores remotos*. Colombia: Universidad del Valle.
- Paladines, O., Izquierdo, F., & Salazar, M. (2003). *Recomendaciones técnicas para la fertilización de pasturas en el Centro-Norte de la sierra Ecuatoriana*. Quito: INIAP.
- Paladines, P. (2005). *Efecto de la fertilización nitrogenada y el riego en el comportamiento de una mezcla forrajera bajo pastoreo. Tumbaco-Pichincha: Rumipamba*. Quito: Universidad Central del Ecuador.
- Paz, F. (2005). Análisis de los espacios espectrales de la reflectividad del follaje de los cultivos. *Agrociencia*, 293-301.
- Pearson, C., & Ison, R. (1997). *Agronomy Of Grassland System*. . Cambridge: Cambridge Univesrity Press.
- Pérez, C., & Muñoz, A. (2006). *mundocartogeo.files.wordpress.com*. Retrieved from <https://Mundocartogeo.Files.Wordpress.Com/2015/03/Teledeteccion-Nocionesaplicaciones-2006publico.Pdf>
- Ramirez, A. (2013). *Evaluación del crecimiento de pastos usando índices de vegetación calculados a partir de información satelital*. Colombia: Universidad Nacional de Colombia.
- Reinoso, P., & Guartambel, D. (2018). *Valoración nutricional de recursos alimenticios suministrados a vacas lactantes en 8 haciendas de la sierra entre los 2500 Y 3500 msnm*. Sangolquí: Universidad de las Fuerzas Armadas - ESPE.
- Robson, M., Ryle, G., & Wodledge, J. (1988). *The grass plant –its form and function*. London: Lazenby.
- Rocha, S., & Changoliusa, E. (2011). *Evaluación de una mezcla forrajera (raygrass, pasto azul, trébol blanco y llantén) a los 30 y 45 días de rebrote, más suplemento concentrado en vacas lactantes en la Hcda. San Jorge, Parroquia Machachi-Sector Aloag. Latacunga*. Latacunga: Universidad Técnica de Cotopaxi.
- Rodriguez, R. (1998). 1998. *Ciencias Agrarias*, 135-150.
- Rodríguez, V., & Bullock, S. (2013). Comparación espacial y temporal de índices de la vegetación para verdor y humedad y aplicación para estimar LAI en el Desierto Sonorense. *Revista Mexicana de Ciencias Agrícolas*, 611-623.
- Sánchez, E., Torres, M., Palacios, A., Aguilar, M., Pino, I., & Granado, L. (2000). Comparación del NDVI con el PVI y el SAVI como indicadores para la asignación de

- modelos de combustible para la estimación del riesgo de incendios en Andalucía. *Tecnologías geográficas*, 164-174.
- Sarría, F., & Palazón, J. (2008). *Fundamentos físicos de la teledetección*. Murcia: Matclass.
- Sellers, P. (2007). Canopy reflectance, photosynthesis and transpiration . *Hydrological Sciences*, USA.
- Sims, D. &. (2002). Relationships between leaf pigment content and spectral reflectance across a wide range of species, leaf structures and developmental stages. *Remote Sensing of Environment*, 337-354.
- Sims, D., Luo, H., Hastings, S., Oechel, W., Rahman, A., & Gamon, J. (2006). Sims, D., Luo, H., Hastings, S., OeParallel adjustments in vegetation greenness and ecosystem co2 exchange in response to drought in a southern california chaparral ecosystem. remote sensing of environment. *Science direct*, 289-303.
- Torrijos, G. (2008). Aplicación de la Radiometría en agricultura. *Grupo de investigación GEOTOPO*, 38-45.
- Wilman, D., & Wright, W. (1983). Some effects of applied nitrogen on the growth and chemical composition of temperate grasses. *Herbage*, 387-393.
- Yang, Z., Nie, G., Pan, L., Zhang, Y., Huang, L., Ma, X., & Zhang, X. (2017). *Development and validation of near-infrared spectroscopy for the prediction of forage quality parameters in Lolium multiflorum*. 2017: Sichuan Agricultural University.
- Yates, H., Tarpley, J., Schneider, S., MCGinnis, D., & Scofield, R. (1984). Yates, H., Tarpley, J., SchneThe role of meteorological satellites in agricultural remote sensing. *Remote sensing of environment*, 219-233.