

EVALUACIÓN DEL CRECIMIENTO DE PASTOS USANDO ÍNDICES
DE VEGETACIÓN CALCULADOS A PARTIR DE INFORMACIÓN
SATELITAL

ALEJANDRO RAMIREZ MADRIGAL
Zootecnista

TESIS
Maestría Medio Ambiente y Desarrollo

Directora
VERONICA BOTERO FERNANDEZ
Ingeniera Civil, MSc. PhD.

Codirector
ROLANDO BARAHONA ROSALES
Zootecnista, MSc. PhD.

UNIVERSIDAD NACIONAL DE COLOMBIA
FACULTAD DE MINAS
ESCUELA DE GEOCIENCIAS Y MEDIO AMBIENTE
MEDELLIN
2013

RESUMEN

Las técnicas para el monitoreo de praderas destinadas a ganadería son diseñadas a escala de praderas. Sin embargo, las políticas de modernización de la ganadería requieren monitoreo a escalas mayores. Como alternativa surgen los índices de vegetación (IV) calculados con información satelital. En este estudio se buscó evaluar y monitorear la producción de pastos con información de sensores remotos para la transformación de la ganadería tradicional a la ganadería sostenible en la zona lechera de Antioquia, departamento Colombiano. Se representaron dos escalas de información satelital en dos diferentes sensores (Landsat7, 30mx30m y Modis Terra, 250m x 250m), se valoraron asuntos de resolución espacial y temporal. Se observó el comportamiento de tres IV, dos IV propiamente dichos y uno basado en un enfoque fisiológico. Se evaluaron la relación de estos IV y datos en campo de biomasa aérea de pasto (BAP) en fincas productoras de leche. Se validó las relaciones encontradas con otras fincas de las mismas condiciones productivas y posteriormente se evaluó la producción de pasto a escala municipal. Como conclusiones generales se encontró que Landsat es promisorio para evaluar predios menores a 9 Ha, el enfoque fisiológico tiene una relación con BAP superior a los IV propiamente dichos. Que la BAP en pastos limpios y manejados es superior a las otras coberturas de pastos coincidiendo con la literatura y se recomienda hacer estudios con otras formas de muestreo en campo más intensivas y se sugiere formas de mejorar el abordaje del enfoque fisiológico

Palabras claves: Ganadería, índices de vegetación, Landsat, Modis, praderas.

AGRADECIMIENTOS

Agradezco de forma muy profunda a mi familia por ser el respaldo en todas las situaciones: Helí Ramírez, Rosa María Madrigal, Carlos Andrés Macía, Isaac Macía, Samuel Macía, Leonora Sosa y Rosmira Gómez.

Agradezco y me disculpo de forma muy sincera con mi directora y mi codirector de tesis: Profesora Verónica Botero y Rolando Barahona; ambos me generaron oportunidades mayores a mis merecimientos, enseñanzas del orden académico y fueron ejemplo extraordinario de calidad humana y de lucha en el orden personal.

Agradezco a mis compañeros de maestría, por compartir y gestionar las angustias, y generar una familiaridad poco común en estos niveles de formación.

Agradezco a la Universidad Nacional, al laboratorio de geomática, al IDEA, al zootecnista Nicolás Cárdenas por el apoyo logístico y la generación de oportunidades.

Agradezco a mis cómplices y compañeros de sueños: los “7/17” y los “Montañeros-A” sin los cuales la vida sería muy aburrida.

Probablemente se me escape a quien más agradecer, espero que me disculpen, para ellos también un abrazo.



DEDICATORIA

***“Nuestra vida no nos pertenece. Del vientre a la tumba estamos
unidos a otros, pasado y presente. Y con cada crimen que
cometemos y cada gesto amable, damos nacimiento a nuestro
futuro.” Cloud Atlas***

***A los que tejen, los que tejieron y los que tejerán esa red invisible
con gestos amables.***

CONTENIDO

| | |
|--|----|
| CONTENIDO..... | 5 |
| 1. INTRODUCCIÓN..... | 9 |
| 2. PROYECTO DE INVESTIGACIÓN..... | 10 |
| 2.1. OBJETIVO GENERAL..... | 10 |
| 2.2. OBJETIVOS ESPECIFICOS..... | 10 |
| 2.3. PLANTEAMIENTO DEL PROBLEMA..... | 11 |
| 2.4. JUSTIFICACIÓN..... | 11 |
| 3. MARCO TEÓRICO..... | 15 |
| 3.1 Conceptos y términos..... | 15 |
| 3.1.1. Teledetección y sensores remotos..... | 15 |
| 3.1.2. Landsat y Modis..... | 16 |
| 3.1.3. Los índices de vegetación (IV)..... | 17 |
| 3.1.4. Enfoque fisiológico de uso de la luz..... | 18 |
| 3.1.5. Los pastos y las praderas..... | 18 |
| 3.2. Contexto internacional..... | 20 |
| 4. METODOLOGÍA DE INVESTIGACIÓN..... | 24 |
| 4.1. Zona de estudio..... | 24 |
| 4.1.1. Los predios..... | 25 |
| 4.2. Biomasa Aérea de pasto (BAP)..... | 28 |
| 4.3. Selección de satélites e IV..... | 29 |
| 4.4. Calculo de NDVI y SR..... | 30 |
| 4.4.1. Corrección Atmosférica..... | 31 |
| 4.4.2. Índices de vegetación..... | 31 |
| 4.4.3. Mascara de pixeles válidos..... | 32 |
| 4.4.4. Calculo de APAR..... | 33 |

| | |
|---|----|
| 4.4.5. Radiación..... | 33 |
| 4.4.6. Remuestreo y APAR..... | 34 |
| 4.5. Correlación entre BAP e IV (SR y NDVI) y APAR..... | 34 |
| 4.6. Validación..... | 34 |
| 4.7. Análisis a escala municipal de pastos..... | 35 |
| 5. RESULTADOS Y DISCUSIÓN..... | 37 |
| 5.1. BAP en campo..... | 37 |
| 5.1.1. Niveles productivos..... | 37 |
| 5.1.2. Estacionalidad de la producción..... | 38 |
| 5.2. Imágenes..... | 39 |
| 5.2.1. Imágenes encontradas..... | 39 |
| 5.2.2. Observaciones prediales válidas..... | 40 |
| 5.2.3. Resolución espacial..... | 42 |
| 5.3. Índices de vegetación NDVI, SR y APAR..... | 44 |
| 5.4. IV vs Biomasa aérea de pasto..... | 45 |
| 5.5. Validación..... | 51 |
| 5.6. Análisis de pasturas a escala municipal de San Pedro de los Milagros | 53 |
| 6. CONCLUSIONES..... | 60 |
| 7. RECOMENDACIONES..... | 62 |
| BILBIOGRAFÍA..... | 63 |
| ANEXOS..... | 67 |

LISTADO DE TABLAS

| | |
|--|----|
| Tabla 1. Información ofrecida por Landsat 7..... | 16 |
| Tabla 2. Relación de bibliografía específica para pastos e imágenes satelitales... | 30 |
| Tabla 3. Imágenes satelitales encontradas..... | 39 |
| Tabla 4 área productiva y número de pixeles contenidos..... | 42 |

| | |
|--|----|
| Tabla 5 Estadísticas descriptivas de SR, NDVI y APAR para los dos sensores..... | 44 |
| Tabla 6 R^2 entre La producción de BAP (KgMS/M ²) y diferentes transformaciones, con IV y Transformaciones del Satélite Landsat..... | 46 |
| Tabla 7 R^2 entre La producción de BAP (KgMS/M ²) y diferentes transformaciones, con IV y Transformaciones del Satélite Modis..... | 46 |
| Tabla 8: Elementos de la ecuación de la línea recta para IV derivados de Landsat | 51 |
| Tabla 9 Biomasa Aérea de Pasto, medida en campo y por medio de las ecuaciones generadas..... | 52 |
| Tabla 10: prueba Tukey para BAP..... | 53 |
| Tabla 11: Comparación de medias por el método Tukey ajustado (TDK)..... | 58 |
| Tabla 12 Anexo1: Biomasa MS medida para predios del numeral 4.2..... | 67 |
| Tabla 13 Anexo2 Datos usados en el numeral 4.5 de BAP promedio, NDVI, SR y APAR tanto Modis como Landsat por predio..... | 71 |
| Tabla 14 Anexo 3 Eventos por predio, aforos e imágenes Modis y Landsat..... | 80 |
| Tabla 15 Anexo 4 Biomasa MS medida para predios de la validación..... | 88 |
| Tabla 16 Anexo 5 Datos usados en la validación de BAP promedio, NDVI, SR, y APAR tanto Modis como Landsat por predio..... | 89 |

INDICE DE ILUSTRACIONES

| | |
|---|----|
| Ilustración 1 San Pedro de los Milagros..... | 25 |
| Ilustración 2 Ubicación de los predios..... | 26 |
| Ilustración 3 Esquema seguido para el tratamiento de imágenes Landsat y Modis | 31 |
| Ilustración 4 a la derecha combinación en falso color 5, 4, 3 dentro de la zona de estudio. Y a la izquierda nube (azul), no nube (verde) y gaps (rojo) de la misma área..... | 32 |
| Ilustración 5 Esquema seguido para el cálculo de APAR..... | 33 |
| Ilustración 6 Procedimientos en el análisis de BAP para el municipio de San Pedro De Los Milagros..... | 36 |
| Ilustración 7 Biomasa aérea de pasto calculado en campo para cada predio (valores máximo, mínimo y promedio)..... | 38 |

| | |
|--|----|
| Ilustración 8 Biomasa aérea de pasto calculado en campo antes de pastoreo para a lo largo del tiempo para cada predio..... | 39 |
| Ilustración 9 Observaciones prediales aptas dentro del periodo de estudio..... | 41 |
| Ilustración 10 Valor de APAR para el predio Altamira con los dos satélites..... | 44 |
| Ilustración 11 Valores de pixeles NDVI, SR y APAR..... | 45 |
| Ilustración 12 correlación lineal Biomasa aérea (KgMS/M ²) con los IV de mayor correlación..... | 47 |
| Ilustración 13 Comparación de R ² entre IV más altos en ambos Satélites..... | 48 |
| Ilustración 14 correlación lineal Biomasa aérea (MS) con PAR tanto con Landsat como con Modis..... | 51 |
| Ilustración 15 Tipos de pastos (Corine Land Cover Nivel 3) San Pedro de los Milagros. Para el año 2007..... | 54 |
| Ilustración 16 BAP de los pastos del municipio de San Pedro de los milagros..... | 55 |
| Ilustración 17 BAP de los pastos arbolados del municipio de San Pedro de los milagros..... | 56 |
| Ilustración 18 BAP de los pastos Enrastrojados del municipio de San Pedro de los milagros..... | 57 |
| Ilustración 19 BAP de los pastos limpios y manejados del municipio de San Pedro de los milagros..... | 58 |

INDICE DE ECUACIONES

| | |
|--------------------------|----|
| Ecuación 1 NDVI..... | 17 |
| Ecuación 2 SR..... | 18 |
| Ecuación 3 BAPndvi..... | 51 |
| Ecuación 4 BAPsr..... | 51 |
| Ecuación 5 BAPapar1..... | 52 |
| Ecuación 6 BAPapar2..... | 52 |

1. INTRODUCCIÓN

FEDEGAN se ha propuesto para el 2019, en el Plan Estratégico de Ganadería Colombiana (PEGA), duplicar la carga animal en términos de Unidades Gran Ganado UGG (de 1.5 UGG a 3 UGG) y reducir a la mitad el área empleada en la ganadería. En este sentido, se debe considerar que la productividad ganadera está estrechamente relacionada con el uso y el manejo de los recursos forrajeros, puesto que éstos son la fuente principal de alimento de los bovinos (FEDEGAN 2009). Además, este órgano gremial plantea como alternativa para lograr las metas mencionadas, la transformación de la ganadería tradicional de baja productividad y altos impactos ambientales negativos hacia una ganadería silvopastoril, cuyos impactos ambientales son positivos y ayuda a la intensificación de la actividad ganadera.

Para esto es necesario generar sistemas de información y monitoreo de las praderas, que orienten la transición de ganadería tradicional a ganadería sostenible, tanto a los productores ganaderos como a los entes gubernamentales, financieros y gremiales. Estos sistemas de información y monitoreo no pueden basarse en los métodos agronómicos tradicionales para medir la producción de biomasa de los recursos forrajeros, debido a su ineficiencia en escalas espaciales de carácter regional o nacional. Como alternativa surgen los sistemas de información geográfica (SIG), basados en el monitoreo satelital de praderas, como en otros países se han desarrollado.

Existen numerosas experiencias de monitoreo satelital de praderas alrededor del mundo. Éstas parten del uso de diferentes índices de vegetación, escalas de análisis y propósitos de estudio. Esta tesis aborda la aplicabilidad de tres diferentes Índices de Vegetación (NDVI, SR y APAR), calculados usando datos de dos satélites (Landsat y Modis) en la zona lechera de Antioquia en predios pequeños. Posteriormente, se hace un análisis a nivel de municipio de las coberturas Corine Land Cover relacionadas con los pastos.

Esta tesis aborda el uso de información satelital para la vigilancia de praderas en la zona productora de leche especializada de Antioquia. Esto se realiza mediante un capítulo que describe el proyecto de investigación. Otro capítulo que muestra el marco teórico y algunas experiencias internacionales. Posteriormente se describen todos los procedimientos metodológicos desarrollados. Más adelante se muestran los resultados, discutiéndolos simultáneamente. Y por dos capítulos, uno con las conclusiones del estudio y otro con las recomendaciones para posteriores investigaciones.

2. PROYECTO DE INVESTIGACIÓN

2.1. OBJETIVO GENERAL

Evaluar y monitorear la producción de las praderas en ganaderías especializadas en el Norte de Antioquia mediante la utilización de sensores remotos.

2.2. OBJETIVOS ESPECIFICOS

- Comparar tres diferentes índices de vegetación (IV) que posibiliten el monitoreo de praderas a escala regional, usando como criterio la disponibilidad de imágenes y su resolución espacial.
- Encontrar el IV que más correlación presenta con los datos de biomasa obtenidos de forma tradicional en campo de ganadería de leche especializada.
- Analizar municipalmente la disponibilidad de pasto en función de su distribución en categorías de tipos de pasturas.

2.3. PLANTEAMIENTO DEL PROBLEMA

El Gobierno Nacional y FEDEGAN (2006) han manifestado, dentro del Plan Estratégico de la Ganadería Colombiana (PEGA), la necesidad de remplazar las tradicionales praderas por Sistemas Silvopastoriles (SSP). Esto con el propósito de modernizar la ganadería colombiana disminuyendo los impactos ambientales, aumentando la densidad bovina y buscando una buena posición en el contexto generado por los tratados de libre comercio (TLC). Este cambio de las tecnologías de revolución verde (praderas tradicionales) a tecnologías más amigables y agroecológicas, pretende dar un uso adecuado al territorio, disminuir la presión sobre los bosques y liberar tierras ganaderas para la agricultura.

Ahora bien, este cambio tecnológico requiere mecanismos de monitoreo. Sin embargo, las metodologías usadas tradicionalmente en Colombia están diseñadas para pequeñas parcelas. Esto significa que al evaluar pastos a escala municipal o regional no existen mecanismos eficientes.

Ante problemas similares, otros países han optado por el monitoreo satelital de sus praderas mediante cálculos de Índices de vegetación (IV). No obstante, sus condiciones específicas distan en algunos elementos del contexto nacional, como las condiciones climáticas y los tamaños de los predios. En este sentido, es necesario responder algunos interrogantes: ¿Cuál es el IV que mejor se correlaciona con la producción de biomasa de pastos en Colombia? ¿Cuáles son los efectos de la resolución espacial de las imágenes empleadas con los IV y su correspondencia en campo?, entre otras preguntas pertinentes derivadas de las anteriores.

La hipótesis que se plantea es que bajo condiciones de información escasa se pueden hacer aproximaciones de la producción de biomasa por sensores remotos a escala regional. Ya que existe una relación entre la biomasa de pastos y los IV, la cual depende de la escala temporal y espacial del satélite.

2.4. JUSTIFICACIÓN

La ganadería tiene importancia económica. La FAO (Neely 2009) plantea que la producción pecuaria representa el 40% del valor bruto de la producción agropecuaria mundial. Esta importancia económica se manifiesta más en contextos marginados que en países desarrollados, debido a que esta actividad es una fuente insustituible de los medios de subsistencia para los pobres. Esta afirmación se debe a que en los países en vías de desarrollo entre el 50-80% del PIB nacional depende de la ganadería. También plantea que a nivel mundial 1000 millones de personas dependen de la ganadería y que de los 880 millones de personas pobres rurales que viven con menos de un dólar al día, el 70% deriva su sustento de esta actividad.

Sin embargo, esta actividad económica es cuestionada por sus impactos ambientales como la emisión de gases efecto invernadero. El IPCC (2007) plantea que la agricultura (cultivos y ganadería) aportan el 14% de las emisiones de eqCO₂. Además, el cambio del uso de la tierra de bosques a uso agropecuario (principalmente a pasturas) es responsable del 18% del eqCo₂. El IPCC afirma que la ganadería es responsable del 37% del metano y 65% del óxido nitroso antropogénico.

Otro aspecto importante es la alta cobertura territorial que la ganadería ocupa en el mundo. La FAO (Neely 2009) reporta que las praderas cubren el 30% de las tierras no cubiertas de hielo del planeta y que la ganadería extensiva representa un cuarto de la superficie terrestre del mundo. Esta presencia territorial tiende a aumentar, debido a que se reportan 1,5 millones de hectáreas por año despejados para ganadería. Esto se relaciona con la pérdida de bosque y su consecuente pérdida de biodiversidad.

Los impactos de la ganadería tienden a aumentar por la demanda de sus productos. La FAO (Bruinsma 2002) plantea que el crecimiento de la demanda de alimentos está influenciado por el crecimiento de la población, la cual se proyecta en 1.1% anual hasta el 2030. Este aumento de la población, junto con las metas de reducción de la desnutrición, implican que la demanda de alimentos aumentará en un 1.6% anual hasta 2015 y que de este año hasta el 2030 el crecimiento será de 1.4% anual. El informe de la FAO (Bruinsma 2002) manifiesta que: “A medida que aumentan los ingresos, la gente prefiere, en general, gastar una mayor parte de su presupuesto para alimentos en proteínas de origen animal, por lo que el consumo de carne y productos lácteos tiende a crecer con mayor rapidez que el de los cultivos alimentarios” (P:58). A nivel mundial, las proyecciones muestran que se requiere un incremento del 24% del ganado vacuno, es decir, 360 millones más de estos animales.

De acuerdo con este informe, se espera que el aumento de la ganadería sea en sistemas de producción más industriales que extensivos. Esto exige una gestión altamente especializada que haga uso de materiales genéticos mejorados, sistemas de alimentación sofisticados y sistemas profilácticos de salud animal.

Desde este punto de vista, la gestión especializada no solo se debe aplicar al nivel de predio sino a niveles mayores como cuenca, región o país. Pero la FAO (Bruinsma 2002) alerta que: “las tendencias actuales hacia la producción industrial y comercial pueden plantear una amenaza para la población rural pobre” (P:61). Como ya se argumentó, esta capa social en las zonas rurales depende de la producción pecuaria, la cual requiere protección estatal con “medidas políticas capaces de ayudar a los pobres a entrar y permanecer en el mercado en expansión de los productos pecuarios” (P:61). Para armonizar la gestión altamente especializada en zonas de población rural pobre, las políticas son posibles con un buen conocimiento de los medios biofísicos de los territorios ganaderos, que aporte no solo al desarrollo sino que contribuya también a la fijación de carbono. Tal como plantea el IPCC (2007), la ganadería es altamente promisorio para la

fijación del carbono, puede contribuir a detener la pérdida de bosques y la competencia por tierra para la producción de otros alimentos como los cereales.

Lo anterior no solo se manifiesta a escala mundial, sino también a escala nacional con algunas diferencias. En Colombia el eslabón primario de la ganadería bovina ocupa 38.3 millones de Ha, representando el 33.54% del área nacional. Sin embargo, el aporte de todo el subsector es del 3.6% del PIB nacional, lo que indica una alta ocupación del territorio y una ineficiencia del uso de los recursos. A pesar de que se plantea un aumento de la demanda de productos bovinos por el crecimiento demográfico, el acceso y permanencia en mercados internacionales es limitada para Colombia. Esto implica la pérdida de oportunidades abiertas con la firma de los tratados de libre comercio (TLCs) por el país y la amenaza de la estabilidad económica de los pequeños productores (FEDEGAN 2006).

Bajo este panorama, FEDEGAN se ha propuesto para el año 2019 las metas de equidad social, menor impacto ambiental, duplicar la carga animal y reducir a la mitad el área empleada en la ganadería. Para tales fines, se debe considerar que la productividad ganadera está estrechamente relacionada con el uso y el manejo de los recursos forrajeros, puesto que éstos son la fuente principal de alimento de los bovinos (FEDEGAN 2009). Además, el IPCC (Metz 2007) plantea que el mejoramiento de las dietas de los bovinos por la vía de los pastos es una forma eficiente de reducir el CH₄ y potenciar la fijación de CO₂. Por esta razón, FEDEGAN propone como alternativa la transformación de la ganadería tradicional hacia una ganadería silvopastoril, porque la primera es de baja productividad y tiene altos impactos ambientales negativos, mientras que en la segunda los impactos ambientales son positivos y ayuda a la intensificación de la actividad ganadera.

En el caso de Antioquia, el anuario estadístico del sector agropecuario de 2011 (Secretaría de agricultura y desarrollo rural 2012) muestra que el departamento tenía para aquel entonces un total de 2.8 millones de hectáreas en pasto, donde 1.48 millones son pastos naturales, 1.19 millones pastos mejorados y el remanente sistemas silvopastoriles y pastos de corte.

En cuanto a la producción de leche, el anuario caracteriza tres sistemas productivos: en primer lugar, el doble propósito (combina la producción de leche y de carne) con 121.674 vacas en ordeño y una producción promedio de 4.95 litros de leche por vaca al día. En segundo lugar, la lechería tradicional con 180.590 vacas en ordeño y un promedio de producción de 6.67 litros por vaca al día. Y por último, la lechería especializada con 125.836 vacas en ordeño con promedio de 15.71 litros de leche por vaca al día. La lechería especializada se concentra en la subregión del norte de Antioquia. Esta subregión produce 2.35 millones de litros de leche al día de los 3.75 millones de producción departamental.

En este contexto, es necesario generar sistemas de información y monitoreo de las praderas que orienten la transición de ganadería tradicional a ganadería sostenible, tanto a los productores ganaderos como a los entes gubernamentales,

financieros y gremiales. Estos sistemas de información y monitoreo no pueden basarse en los métodos agronómicos tradicionales para medir la producción de biomasa de los recursos forrajeros, debido a su ineficiencia en escalas espaciales de carácter regional o nacional. Como alternativa surgen los sistemas de información geográfica (SIG), la cual se presenta en esta tesis.

3. MARCO TEÓRICO

Este capítulo aborda los conceptos y términos básicos para el entendimiento del presente trabajo como son teledetección y sensores remotos, las características de los sensores Landsat y Modis, se explica los índices de vegetación, particularmente NDVI y SR, se aborda el enfoque fisiológico del uso de la luz y es habla de los pastos y las praderas. También se examina la experiencia internacional respecto al uso de información satelital para la vigilancia de cultivos, específicamente en el monitoreo de praderas.

3.1 Conceptos y términos

3.1.1. Teledetección y sensores remotos.

Chuvienco (2000) define la teledetección como la forma de adquirir información de un objeto o fenómeno por un aparato de registro que no está en contacto físico con éste. Este mismo autor define un sensor como cualquier aparato artificial o humano que puede captar información de un objeto sin tener contacto directo con él. De acuerdo con esta definición, un sensor para el monitoreo de la tierra puede ser el ojo humano, una cámara fotográfica o un satélite diseñado con estos fines.

Para el propósito del presente trabajo, se asume una definición de teledetección similar a la usada por Campbell (1996), en la cual se plantea como la acción de adquirir información de la superficie de la tierra por sensores a bordo de satélites. Los sensores remotos se clasifican en pasivos y activos. Los primeros se caracterizan por captar una fuente de energía externa proveniente del sol, luego de que ésta sea reflejada por la superficie terrestre. Los segundos son radares, los cuales captan una fuente de energía emitida por el propio sensor, luego de que ésta sea reflejada por la tierra. En esta tesis se utilizarán sensores pasivos, por lo que la siguiente explicación solo se remite a ellos.

Existen dos factores que definen el análisis en los sensores remotos: la resolución espacial y temporal. En la resolución espacial, el nivel de detalle que los sensores remotos proporcionan depende de manera directa de la mínima unidad de observación del terreno, es decir, del tamaño del pixel (Schowengerdt, 1997). En la resolución temporal, las características del sensor como la altura, la velocidad, la inclinación en que encuentra la órbita y el ángulo de la cobertura determinan la periodicidad con que el sensor adquiere imágenes de la misma porción de la superficie terrestre (Chuvienco 2000).

Según Schowengerdt (1997), una banda es un canal de adquisición de datos con un intervalo de longitud de onda similar dentro del espectro electromagnético. Cada una de las bandas tiene un ancho determinado por la porción espectral que cubre. Igualmente, cada imagen del sensor remoto está compuesta por una o muchas bandas, que van desde una en los radares, desde dos a decenas en los sensores multiespectrales y llegando a cientos en los hiperespectrales. El número de estas bandas que una imagen tiene, junto con el ancho de las mismas, se le

conoce como resolución espectral. Los sensores que se usaron dentro de esta tesis se clasifican como multiespectrales, ya que tienen ocho bandas en el caso de Landsat y 36 bandas en el caso del Modis.

3.1.2. Landsat y Modis

La página web oficial del programa Landsat expresa que el 23 de Julio de 1972 fue la puesta en órbita del primer satélite de la serie ERTS (Earth Resource Technollogy Satellite). Este proyecto de la Agencia espacial norteamericana (NASA) que fue el primero diseñado exclusivamente para la observación de la tierra, en el segundo lanzamiento fue renombrado como Landsat en 1975. El programa Landsat se considera el más fructífero de los proyectos de observación de la tierra, puesto que es el registro más largo de información sobre la superficie terrestre obtenido de forma global, multiespectral y repetitiva desde el espacio.

El proyecto Landsat 7 es administrado por tres agencias norteamericanas, la NASA con funciones de desarrollo y lanzamiento del satélite, la National Oceanic and Atmospheric Administration (NOAA) encargada de operación y mantenimiento del sistema durante la vida del proyecto y el U.S. Geological Survey (USGS) encargada del procesamiento y distribución de los datos. Este proyecto tiene el mapeador temático mejorado (ETM+) que mejora ostensiblemente los datos de la versiones anteriores de Landsat pero dando continuidad a los datos de estos, con una cobertura de 185 Km y una resolución espacial de 16 días. La tabla 1 muestra las bandas de información que ofrece Landsat 7 (Irons 2013)

Tabla 1. Información ofrecida por Landsat 7

| Band a | Color | Longitud de onda (um) | Resoluci ón |
|-------------------|-----------------------|----------------------------------|------------------------|
| 1 | Azul | 0.45-0.52 | 30m |
| 2 | Verde | 0.52-0.60 | 30m |
| 3 | Rojo | 0.63-0.69 | 30m |
| 4 | Infrarrojo próximo | 0.76-0.90 | 30m |
| 5 | Infrarrojo medio | 1.55-1.75 | 30m |
| 6 | Termal | 10.4-12.5 | 60m |
| 7 | Infrarrojo lejano | 2.08-2.35 | 30m |
| 8 | Pancromática | 0.50-0.90 | 15m |

Fuente: Pagina Landsat

El Moderate Resolution Imaging Spectroradiometer (Modis) (Maccherone 2013) es un sensor a bordo de los satélites TERRA y AQUA, puesto en órbita en 1999 y 2002 respectivamente. MODIS logra una cobertura de la tierra en de 1 a 2 días en

36 bandas espectrales con longitud de onda de 0.405um hasta 14.385um, la resolución espacial que ofrece el sensor es 250m para las bandas 1 y 2; 500m para las bandas 3 a 7 y de 1km las bandas 8 a 36.

Modis entrega esta información en 44 productos agrupados por las áreas de: calibración, atmósfera, tierra, criósfera y océano. Dentro de los productos de la tierra, se destacan los productos MOD13 que se refieren a los índices de vegetación NDVI y EVI, con una temporalidad de 16 días, donde se encuentran los productos MOD13A1, con una resolución de 500m; MOD13A2 con resolución 1km, y MOD13Q1 con una resolución de 250m.

3.1.3. Los índices de vegetación (IV).

Los índices de vegetación, son diferentes relaciones entre las longitudes de onda del espectro electromagnético captadas por los sensores remotos, que están agrupadas por bandas, diseñadas para resaltar una propiedad particular de la vegetación con base en las diferencias espectrales del follaje de las plantas (ITT Corporation 2006). El NDVI utiliza la diferencia entre la alta reflectancia en el infrarrojo cercano, y la baja reflectancia de la parte roja del espectro electromagnético para predecir los parámetros biofísicos de la vegetación (ecuación 1). Esta diferencia se relaciona con aumento de la absorción del rojo por la clorofila para la vegetación más densa, o vegetación con mayor concentración de clorofila, combinado con el aumento de la dispersión de infrarrojos por los componentes estructurales de vegetación (Ferwerda 2005). Estas características hacen posible que el NDVI sea usado como predictor de biomasa (Huete et al. 2002), y de productividad primaria neta (Prince et al. 1995), cuando se usan datos de Landsat TM, para densidades de vegetación media. Por esta razón Ferwerda (2005), pensando en la determinación de nitrógeno en pastos usando sensores hiperspectrales, cuestiona el uso del NDVI para bajas densidades de vegetación y/o de alto contenido de clorofila, como las praderas. A pesar de los cuestionamientos que el NDVI ha tenido en la literatura se sigue usando debido a la disponibilidad de sensores gratuitos cuyas longitudes de onda permiten su cálculo, diferente al contexto planteado por Ferwerda (2005) donde se trata de sensores hiperspectrales. Esto implica que la investigación debe centrarse en la identificación de índices de vegetación que sean de fácil y económico cálculo.

Ecuación 1 NDVI

$$\text{NDVI: } (\rho_{\text{NIR}} - \rho_{\text{R}}) / (\rho_{\text{NIR}} + \rho_{\text{R}})$$

Dónde:

ρ_{NIR} : Niveles digitales de la banda del espectro óptico que corresponden a la longitud de onda del infrarrojo cercano.

ρ_{R} : Niveles digitales de la banda del espectro óptico que corresponden a la longitud de onda del rojo.

El índice de relación simple (SR por sus siglas en inglés) relaciona las altas reflectancias del infrarrojo de la vegetación con las bajas reflectancias del rojo de esta, es decir, usando los mismos principios que el NDVI, y puede ser limitado en

la densa vegetación cuando el índice de área foliar de las plantas es alto. El tutorial Envi4.3 (ITT Corporation 2006) manifiesta que es fácil de entender y efectivo sobre una amplia gama de condiciones. El SR se define por la siguiente ecuación:

Ecuación 2 SR

$$SR: \rho NIR / \rho R$$

Dónde:

ρNIR : Niveles digitales de la banda del espectro óptico que corresponden a la longitud de onda del infrarrojo cercano.

ρR : Niveles digitales de la banda del espectro óptico que corresponden a la longitud de onda del rojo.

3.1.4. Enfoque fisiológico de uso de la luz

Monteith (1972), generó un marco de referencia basado en un modelo ecofisiológico, donde se propone que la productividad en un período de tiempo, está determinada por la cantidad de radiación fotosintéticamente activa absorbida por el dosel en ese período y la eficiencia con que esa energía es transformada en biomasa aérea. McCree (1972) categorizó la luz por su función en la fotosíntesis y encontró que la porción de la luz que potencialmente puede generar actividad fotosintética radiación fotosintéticamente activa (PAR) tiene longitud entre 400 y 700 nm, correspondiendo al rango visible y aproximadamente al 48 % de la radiación.

Con el avance de los sensores remotos y las tecnologías satelitales, algunos investigadores (Hill et al., 2004, Grigera et al. 2007), proponen un enfoque de uso de este modelo ecofisiológico con la información satelital para monitoreo regional de pasto. Esto debido a que información requerida por el modelo, como es el estado de la vegetación, ya puede ser monitoreado de manera relativamente sencilla con estas herramientas. Este enfoque propone que la producción primaria neta de forraje en el suelo (ANPP), se determina por la cantidad de PAR que es absorbido, es decir, de la radiación fotosintéticamente activa absorbida (APAR) por el dosel en un periodo específico, que a su vez depende del área foliar y de la estructura del dosel. Aunque otros autores como Baret et al (2013) abordan el tema del Dosel, para sus estudios globales de biomasa con la medición del Índice de área foliar, la forma en que estos investigadores de biomasa de pasto a nivel regional abordan el dosel del pasto, es por medio de índices de vegetación; en el caso de Hill (2004) NDVI para medir crecimiento del pasto, y Grigera (2007) SR para medir Biomasa aérea del pasto. Debido a los avances mencionados en el uso del enfoque fisiológico, convierten a éste enfoque en una alternativa a los IV únicamente calculados con información espectral.

3.1.5. Los pastos y las praderas

Al hablar de pastos nos referimos a las plantas herbáceas de crecimiento rastrero, según los expresado por Herrero (2000), las variables que determinan el crecimiento del pasto se pueden dividir en dos: las dependientes de la planta

como índice de área foliar y las reservas de carbohidratos; y las variables ambientales como la disponibilidad de nutrientes (mineralización del suelo, agua, reciclaje de nutrientes, fertilización entre otros), condiciones climáticas (precipitación, temperatura y radiación). Jae-Seok Lee (2011), al estudiar el crecimiento de pastos de dos diferentes características fisiológicas distintas ante distintas concentraciones de CO² atmosférico, encontró que la acumulación de biomasa en todos los casos tenía un comportamiento sigmoide según lo esperado, esto quiere decir que los primeros días después de cosechado, las tasas de crecimiento son menores que las tasas de crecimiento luego de recuperar el área foliar y las reservas de carbohidratos, pero iguales a las tasas de crecimientos cercanas a una nueva cosecha, cuando el crecimiento se estabiliza al aproximarse a la floración.

Los pastos, al ser predominante en un territorio, ya sea por condiciones naturales o por efectos humanos, se les denominan praderas, en las cuales se encuentran la producción ganadera. FEDEGAN (2006) plantea que en Colombia, de los 114.1 millones de hectáreas, las praderas tienen 38.3 millones de hectáreas, representando el 77% del área en uso (50.7 millones de hectáreas), donde el 80% de estas praderas son de uso ganadero. Dentro de la orientación productiva del hato colombiano se encuentra la producción especializada de leche, que se concentra básicamente en tres zonas: Nariño, Sabana de Bogotá, y Antioquia, en oriente y norte.

La producción especializada de leche requiere estimar la oferta primaria aérea de pasto y ser balanceada con el consumo de pasto de los animales. En consecuencia, la estimación de la producción de forraje es una actividad de planeación de gran importancia a nivel de finca. Para este propósito existen métodos de medición directos basados en la cosecha y pesaje de la biomasa aérea, métodos indirectos calibrados con los anteriores y métodos de simulación (Hirata et al. 2005; Cuesta 2005) La estimación de productividad a partir de cosechas es poco práctica a escalas grandes, por la variabilidad espacial y temporal, lo que hace necesario muchos muestreos; los modelos indirectos son menos demandantes, pero al igual que la cosecha directa sigue requiriendo muestreos intensos a escala de predio; los modelos de simulación de pasturas requieren información detallada de otras variables como por ejemplo edáficas, que son igual o más difíciles de adquirir que la cosecha directa, por lo que no son de uso a nivel productivo. Por estos motivos en nuestro contexto sigue siendo los modelos indirectos los más usados.

La manifestación territorial de la ganadería se expresa en las praderas o coberturas de pasto. Para tener el mismo criterio de categorización de la cobertura terrestre, la unión europea generó el proyecto CORINE LAND COVER. El Instituto de Hidrología, Meteorología y Estudios Ambientales (IDEAM 2010), publicó la metodología CORINE LAND COVER adaptada para Colombia. Esta metodología comprende niveles que aumentan el detalle.

La Metodología CORINE LAND COVER adaptada, clasifica a los pastos dentro de los territorios agrícolas. A su vez los clasifica en tres subcategorías:

- La primera subcategoría son los pastos limpios, definidos como la cobertura ocupada por pastos en más del 70% y que las prácticas de manejo como limpieza, encalamiento y/o fertilización entre otras, no permiten el desarrollo de otra cobertura.
- La segunda subcategoría son los pastos arbolados, esta se define como la tierra cubierta en pastos con presencia de árboles dispersos con altura superior a cinco metros y con cobertura entre el 30% y el 50% del área total de la unidad de análisis.
- La tercera y última Subcategoría son los pastos enmalezados, definidos como pastos con asociaciones vegetales secundarias producto de escasas prácticas de manejo o en proceso de abandono, donde por lo general la vegetación secundaria es menor a 1,5 m de altura.

Estas categorías de uso de la tierra, pueden simbolizar los paquetes tecnológicos que considera el Fedegan en el PEGA. La cobertura de pastos limpios puede simbolizar las fincas de revolución verde por sus altas labores de mantenimiento. La cobertura de pastos arbolados, puede simbolizar la ganadería sostenible o en sistemas silvopastoriles, es decir la ruta de desarrollo que Fedegan desea impulsar. Y las coberturas de pastos enmalezados representan ganaderías extensivas o procesos de abandono de la actividad. Esta consideración es importante al hacer análisis territoriales debido a que la biomasa de cada uno de los pastos está en función de los paquetes tecnológicos que lo mantienen.

3.2. Contexto internacional

Existen múltiples experiencias mundiales donde se plantea el uso de los SIG y la teledetección aplicados a la gestión de la ganadería basados en los recursos forrajeros. Los australianos (Hill et al 2004) apoyan la gestión de los productores de lana mediante la entrega vía internet de la producción de pasto de sus potreros. Para esto se estimó el crecimiento de la pradera (PGR) y los recursos fitogenéticos, usando imágenes del sensor AVHRR calculando el índice normalizado de vegetación (NDVI), relacionándolo con un modelo de eficiencia de uso de la luz (LUE). Este estudio, que se constituye en el modelo general a seguir para otras experiencias, se realizó en seis sitios diferentes, donde tres de estos se analizaron con más detalle; se usó una serie temporal de imágenes entre 1995-1998. Posteriormente se validó en campo en cinco diferentes fincas productoras de lana. Aunque encontraron que el LUE tendió a subestimar el PGR en el momento de máximo crecimiento del pasto, se halló que el modelo podría ser usado en áreas más amplias que los sitios inicialmente destinados para el estudio, y que se pueden hacer mapas de los recursos fitogenéticos que monitoreen la composición botánica de los potreros. Para mejorar el modelo, los autores

recomiendan considerar factor de escala, fertilidad del suelo, los cambios en la fertilidad asociada a las fertilizaciones y migrar los procesos al sensor Modis.

En Argentina, Grigera et al (2007), basándose en la experiencia y recomendaciones de los australianos, diseñaron una herramienta destinada a apoyar la gestión sostenible de los pastizales de la pampa (estado de Corrientes). Esto para categorizar las praderas en función de la producción de biomasa de pasto, estimando la producción primaria neta de forraje (ANPP), en resolución espacial y temporal requerida por los ganaderos de la pampa, usando un enfoque de eficiencia del uso de la radiación (RUE), con imágenes MODIS a las cuales se les calcula el NDVI. Este estudio que se realizó entre los años 2000 y 2003 en ocho potreros, entre pastos mejorados y naturalizados, generó un SIG en 212.794Ha en 83 fincas, quienes recibían correo electrónico mensualmente con la información de cada potrero. El valor de este estudio consiste no solo en la generación y validación científica de la herramienta, sino en la descripción del proceso de adopción de esta tecnología por parte de los productores, que consistía en un correo electrónico mensual, reuniones explicativas y asesoramiento personalizado de la gestión de los potreros usando el SIG.

En China, Yu Long et al (2010), con la intención de medir la capacidad de carga de ganado, calcularon la producción de forraje relacionando los datos de NDVI derivados del satélite MODIS, con datos de campo de los forrajes, obtenida mediante una campaña masiva de muestreo en la zona de estudio. La capacidad de carga se ajustó mediante factores de reducción de la producción de pasto calculados para cada pixel como pendiente, distancia al agua y la erosión del suelo. Los resultados indicaron que se rebasa la capacidad de carga teórica, lo que provocó un deterioro de las praderas entre 1981 y 2005, manifestado en un menor rendimiento del pasto y menor cubrimiento del suelo. Además plantean que la teledetección y los SIG son eficientes para evaluar y monitorear condiciones espaciales y temporales de la pradera, ayudando a entender las tendencias del pasto y a proyectar el repoblamiento ganadero.

En los Estados Unidos, Phillips et al (2009) desarrollaron un SIG usando imágenes de los sensores Landsat Thematic Mapper (TM) y ASTER para estimar a corto plazo la capacidad de pastoreo para los pequeños potreros (1-20 ha). Esto con el propósito de determinar la capacidad de pastoreo, definida como el número de días en que un potrero específico apoya las necesidades nutricionales del ganado vacuno, integrando estimaciones de los requerimientos nutricionales de ganado y la oferta nutricional del potrero en términos de la calidad del forraje (proteína cruda) y la cantidad de forraje (fitomasa), siendo una herramienta para apoyar la toma de decisiones a nivel de potrero, es decir de alta resolución espacial.

El monitoreo satelital de cultivos ha sido utilizado en diferentes partes del planeta. Los enfoques se centran en la utilización de diferentes índices de vegetación y satélites con la intención de observar la biomasa producida. Por ejemplo Mkhabela et al (2010), después de tener varias experiencias en control y predicción del rendimiento de los cultivos, desarrollaron un estudio por medio de herramientas satelitales que pretendía evaluar la posibilidad de utilizar el sensor MODIS con el

NDVI para pronosticar rendimiento de los diferentes cultivos en las praderas canadienses. Relacionando los datos satelitales mencionados como variable independiente y los datos de campo de diferentes cultivos de diferentes regiones como variable dependiente, encontraron que se puede predecir mediante modelos de regresión el rendimiento de las cosechas de los diferentes cultivos, con uno o dos meses de anterioridad a la cosecha, dependiendo del tipo de cultivo, en las zonas de praderas del Canadá. Este estudio no es el primero en esta materia, dado que cita varias experiencias exitosas en cultivos de maíz y algodón en varios países de África, Suiza y España.

Con relación a las praderas naturales, Boschetti et al (2006) diseñaron un método para la adquisición de datos e información sobre el estado de la vegetación a escala local / regional, de una manera rápida y no destructiva, con la posibilidad de integración en un SIG en los Alpes italianos. Esto con la intención de monitorear estos ecosistemas que la Unión Europea considera de importancia, sin utilizar los métodos tradicionales basados en la medición directa de la producción de herbáceas, dado que estos métodos son costosos y requieren mucho tiempo. El valor de esta investigación es reconocer que además del NDVI existen otros índices de vegetación, que pueden relacionarse mejor con las condiciones puntuales de algunos territorios. Como por ejemplo la relación con el suelo y las condiciones de humedad de éste. En este sentido se propusieron examinar la relación entre los índices de vegetación derivados de la reflectancia espectral de campo, y la biomasa fresca sobre el suelo en los pastos alpinos. Al respecto encontraron que los índices de vegetación más comúnmente utilizados para estos estudios (NDV y SR), no tuvieron tanta correlación como con otros índices de vegetación menos usados, generando la pregunta sobre cuál es el índice de vegetación que más explica el comportamiento productivo de las praderas en contextos puntuales. A pesar de este estudio las investigaciones siguen utilizando el NDVI como el índice de vegetación para el estudio de las praderas sin importar el contexto a ser utilizado debido a su fácil cálculo y por la disponibilidad de información satelital en las bandas del rojo e infrarrojo cercano.

Al igual que en Italia, en Argentina Kurtz (2010), se preocupó por la gestión sostenible de los pastizales para la óptima utilización y protección de los recursos naturales, pero esta vez en un contexto ganadero, partiendo del reconocimiento de la importancia de conocer el estado actual de la pradera y la intensidad del pastoreo, usando imágenes Landsat, multitemporales para clasificar las coberturas del suelo y la intensidad del pastoreo. Después de un análisis de correlación entre la información espectral y datos históricos de la biomasa aérea para las tierras de pastoreo, se encontró que la relación entre el total de la biomasa por encima del suelo y el NDVI fue significativa, pero débil. Se encontró que las actuales tasas fueron 16% superiores a las calculadas sólo de la biomasa de pasto superficial. Este estudio aporta una propuesta metodológica para la generación de mapas de cobertura de suelos, separando las intensidades de pastoreo en zonas subtropicales de forma detallada, usando observaciones satelitales. Además, plantea que la clave para generar un producto para analizar coberturas de la tierra

mejora fundamentalmente con la calidad del sensor, generando la discusión de cuál es el satélite más adecuado para el contexto puntual.

Estos estudios que hemos citados se encuentran en latitudes muy extremas comparadas con las de Colombia. En este sentido el estudio de Numata et al (2007), aporta en el conocimiento de las praderas en el amazonas brasilero, entre 8 y 15° S y 60 a 65° W. En este contexto tropical, el estudio se centró en el deterioro de las praderas, debido a que este deterioro contribuye a la expansión de la frontera agrícola en detrimento de los bosques amazónicos. En este estudio relacionaron la productividad del pasto, el suelo y diferentes índices de vegetación, en temporada seca y captada con el satélite Landsat Thematic Mapper (TM). Para este estudio, el Índice de Diferencia Normalizada de infrarrojos (NDII5 y NDII7) resultó mejor indicador de las condiciones biofísicas de los pastos. Además los autores recomiendan analizar con otros satélites de mejor resolución espacial (Aster e Hyperion) y temporal (Modis) para hacer estudios de más detalle.

Archer (2003), en Sudáfrica y un contexto semiárido, se preocupó por los métodos de pastoreo y sus implicaciones ambientales a nivel territorial. Para lo cual relacionó una serie de 14 años del NDVI corregida por los datos de precipitación diaria y la información del tipo de pastoreo levantada mediante encuestas a los productores ganaderos. En este estudio realizaron diferentes recomendaciones prácticas de pastoreo para condiciones de precipitación variable, reconociendo que la precipitación determina el NDVI de manera directa para rangos de precipitación bajos y de manera no tan determinante para rangos mayores. Esto es vital para un contexto colombiano cuando tenemos ganadería, tanto en regiones de baja precipitación como el César, como en alta precipitación, caso Magdalena medio.

En resumen, el desarrollo de la investigación en el área de sensores remotos para el monitoreo de praderas ha llevado a centrar la investigación actual en dos puntos básicamente: Identificar el índice de vegetación más adecuado, e identificar el sensor más óptimo por su resolución espacial y espectral.

4. METODOLOGÍA DE INVESTIGACIÓN

En este capítulo se describe la zona de estudio y los predios donde se levantaron los datos de BAP, se aborda las maneras de adquirir los datos de campo y las formas de tratar las imágenes para calcular los IV. También se describe las formas de relacionar los IV y los datos de BAP, se habla de la manera de validar las relaciones anteriores y se describe la forma en que se aplica a un municipio lechero.

4.1. Zona de estudio.

El estudio se realizó en Colombia, departamento de Antioquia, en los municipios de Belmira y San Pedro de los Milagros de la subregión del norte antioqueño, en el municipio de El Retiro de la subregión del oriente antioqueño y en el corregimiento de Santa Elena en la subregión del Valle de Aburrá. En ellos se evaluaron 15 fincas productoras especializadas de leche.

Estos municipios se caracterizan por tener condiciones agroecológicas similares. Alturas en las cabeceras municipales de hasta 2.700 m.s.n.m, humedad relativa de 79% y temperaturas que están comprendidas entre los 13° y los 19° C (Gobernación de Antioquia ?). Allí predominan las coberturas de pasto hasta en un 50%, las cuales se destinan para la producción de leche especializada, actividad de gran importancia económica para la región. Esto lo resalta cuando manifiesta que “pese a la diversidad de la base económica, solo la producción lechera establece encadenamientos que dinamizan otras actividades pecuarias y a la agroindustria” (P:26).

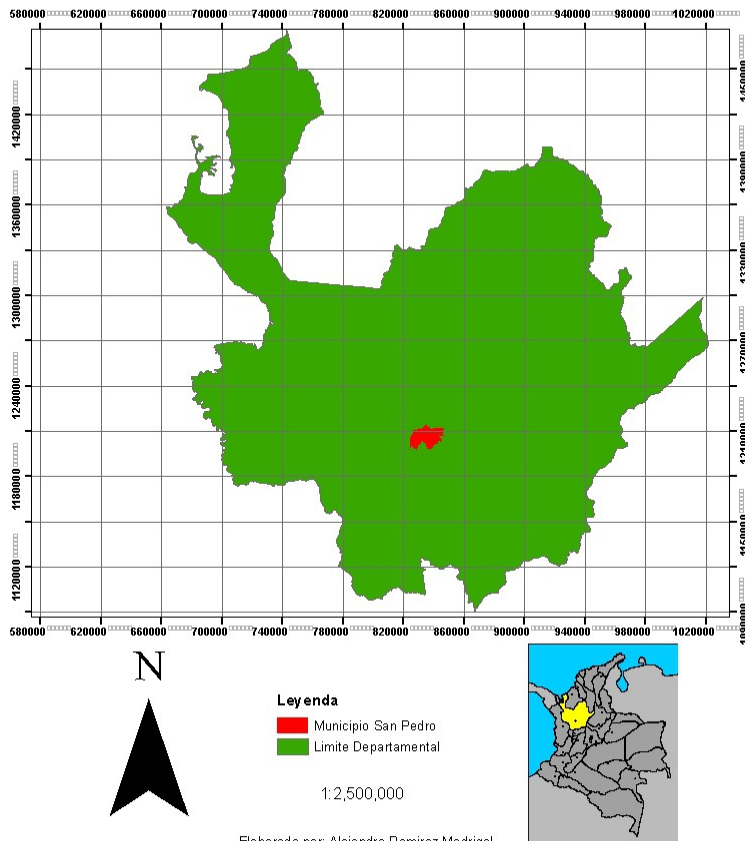
El Concejo Regional de la Cadena Láctea de Antioquia (Palacios 2001) caracteriza el sistema de leche especializada en Colombia, plantea que se basa en pastoreo rotacional con cerca eléctrica y suplementación con alimentos comerciales. Esta misma fuente señala que el pasto kikuyo (*Pennisetum clandestinum* Hoechst. Ex Chiov.) ha sido la base de la alimentación de estos sistemas de producción durante muchas décadas, debido a su hábito de crecimiento estolonífero de alta agresividad y resistencia al pisoteo. Por lo que es muy difícil encontrar suelos desnudos y potreros con una alta diversidad de especies.

La Unidad Regional de planificación agropecuaria de la Secretaria de Agricultura de Antioquia (URPA 2011) categoriza el pasto kikuyo (*Pennisetum clandestinum* Hoechst. Ex Chiov.) Dentro de la categoría de pastos y forrajes². Este tipo de pastos cuenta con 4.26 millones de Ha aptas para el cultivo en el departamento, dentro de las cuales 2.48 millones de Ha se concentran en lo que se conoce como la zona lechera de Antioquia, donde se encuentra más del 60% de la producción láctea del departamento. Por esta razón, se eligió esta zona para el desarrollo de la investigación.

Respecto al análisis municipal propuesto en el objetivo 3, éste se realizó en el municipio de San Pedro de los Milagros (ilustración 1). Las cifras del anuario estadístico de Antioquia 2011 (Secretaría de agricultura y desarrollo rural 2012), plantean que este municipio es el cuarto con mayor inventario bovino de la región (6750 vacas en ordeño). Además, es el que presenta un mayor promedio de producción de leche por vaca al día (22 litros/vaca/día), indicando una intensidad tecnológica superior con respecto al resto de municipios de la subregión. Por esta razón, y por encontrarse allí 7 de los 15 predios estudiados, este municipio será objeto de monitoreo de este estudio a escala municipal.

Ilustración 1 San Pedro de los Milagros

Municipio San Pedro de los Milagros



Elaborado por: Alejandro Ramírez Madrigal.
 Fuentes: Datos IGAC 2007 Entregados por la Secretaría de Agricultura de Antioquia.
 Fecha: Noviembre 2013
 Magna_Colombia_Bogota

4.1.1. Los predios.

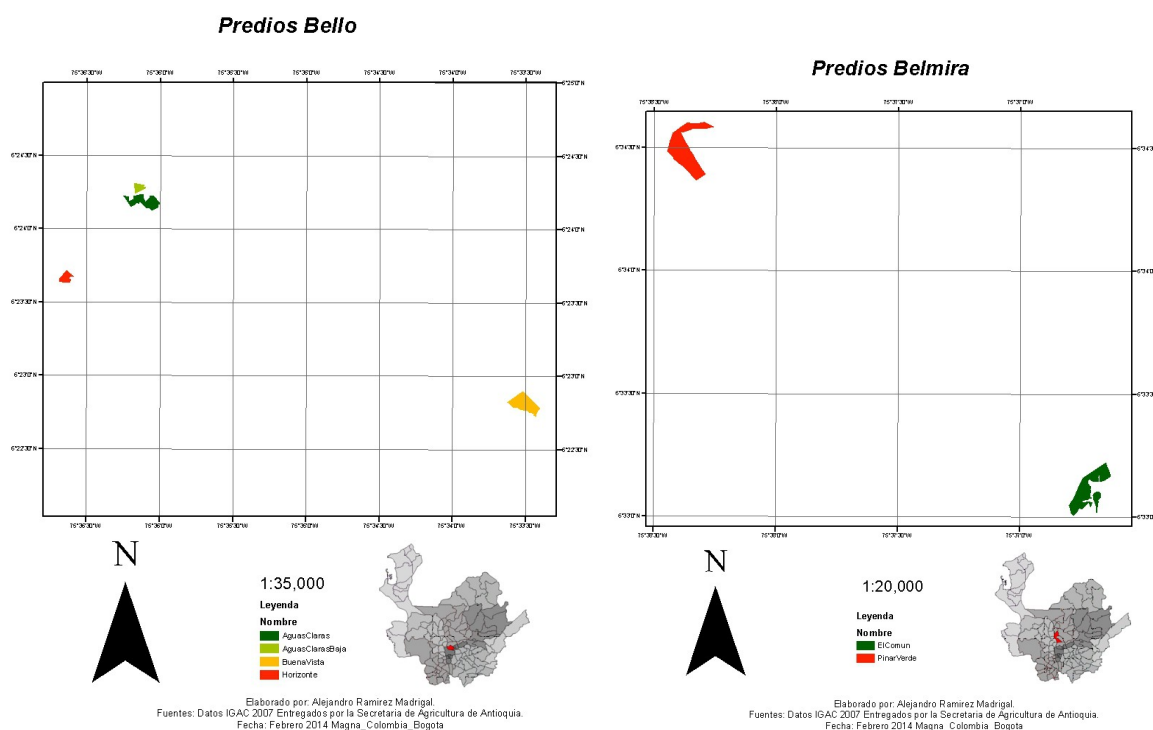
Los predios monitoreados fueron elegidos por la disponibilidad de información. Ésta fue suministrada por el zootecnista Nicolás Enrique Cárdenas Ruíz (Cárdenas 2013), quien la adquirió para la realización de su proyecto de maestría

que actualmente se encuentra en ejecución. El proyecto se titula “Efectos de algunos parámetros productivos, técnicos y administrativos sobre la calidad de la leche en hatos lecheros de Antioquia”, cuyo objetivo es “Determinar el efecto de algunos parámetros nutricionales, ambientales y de manejo sobre la producción y calidad de la leche”. Para este trabajo se midieron diferentes parámetros, entre ellos la oferta de forraje y el rechazo del mismo por parte de vacas lecheras.

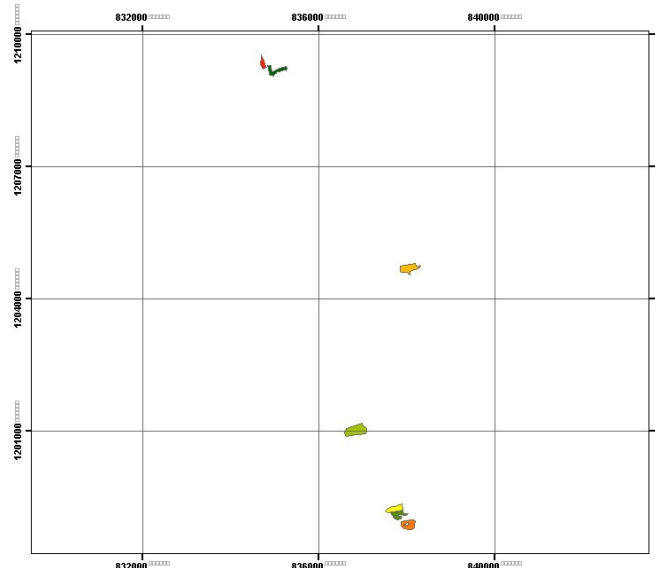
Por tal motivo, los 15 predios son fincas productoras de leche bajo el sistema de pastoreo rotacional con cerca eléctrica durante todo el año. Son potreros con predominio de Kikuyo (*Pennisetum clandestinum*), pendientes planas, altas y ligeramente onduladas. A diario, se le ofrece a los animales que pastorean un área de potrero que va desde 158.16 m² hasta los 4.128,56 m², con un promedio de 993,36 m². Cada potrero tiene un periodo de descanso entre 37 hasta 60 días, con valor medio de 45 días durante la rotación.

Ya que estos predios se encuentran dentro de la zona de estudio, tienen las mismas condiciones agroecológicas y el mismo sistema de producción, hacen que ellos sean objetos de estudio comparables. La ilustración 2 muestra la ubicación geográfica de cada uno de los predios. 7 predios se localizan en el municipio de San Pedro de los Milagros, 4 en el municipio de Bello corregimiento San Félix, 2 en Belmira, 1 en El Retiro y 1 en el municipio de Medellín, corregimiento de Santa Elena.

Ilustración 2 Ubicación de los predios



Predios San Pedro de los Milagros



1:76,076

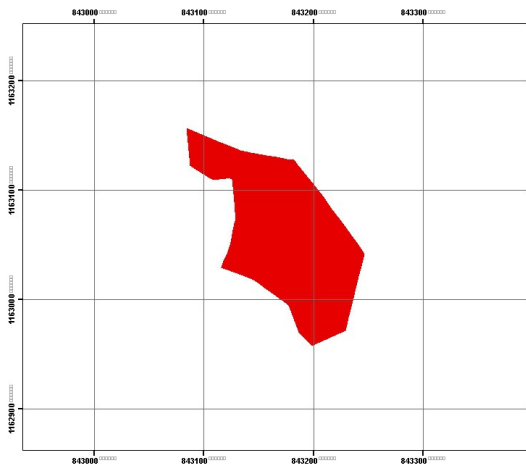
Leyenda

- | Nombre |
|---------------------|
| Atalima |
| HatoSanGabriel |
| LaAlmenseAta |
| LaAlmenseBaja |
| PosadalosLlanosBaja |
| PosadalosLlanos1 |
| Pulgarina |



Elaborado por: Alejandro Ramirez Madrigal.
 Fuentes: Datos IGAC 2007 Entregados por la Secretaria de Agricultura de Antioquia.
 Fecha: Febrero 2014 Magna_Colombia_Bogota

Predios El Retiro



1:2,500

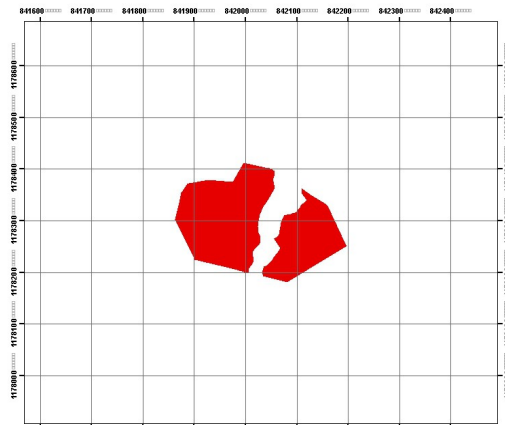
Leyenda

- | Nombre |
|-----------|
| LaCarlota |



Elaborado por: Alejandro Ramirez Madrigal.
 Fuentes: Datos IGAC 2007 Entregados por la Secretaria de Agricultura de Antioquia.
 Fecha: Febrero 2014 Magna_Colombia_Bogota

Predios Medellin



1:5,000

Leyenda

- | Nombre |
|----------|
| Payсандu |



Elaborado por: Alejandro Ramirez Madrigal.
 Fuentes: Datos IGAC 2007 Entregados por la Secretaria de Agricultura de Antioquia.
 Fecha: Febrero 2014 Magna_Colombia_Bogota

4.2. Biomasa Aérea de pasto (BAP)

La producción de biomasa de pasto aéreo de estas fincas fue monitoreada aproximadamente cada mes durante la segunda mitad del año 2011, según la rutina y la necesidad propia del predio. Dicho muestreo se realizó en la franja que se les ofrece a los animales antes y después del pastoreo, obteniendo un valor máximo y mínimo de biomasa de pasto del predio. El promedio de estos dos valores se asumió como el promedio de biomasa aérea de pasto de la finca para ese momento, considerando que en cada predio existen franjas equivalentes de diferentes sucesiones de estado fenológico que están entre el máximo y el mínimo valor de biomasa. (Ver anexo 1 con datos de biomasa de campo).

La medición de biomasa aérea de pasto o aforos se realizaron mediante el método conocido como doble muestreo por rango visual (Haydock et al 1975). Este se realiza por la siguiente sucesión de pasos que se describe a continuación y se representa en la foto 1:

- Valoración cualitativa del crecimiento del pasto: se realiza un recorrido para el reconocimiento de la franja de pasto que va a ser medida, donde se valoran las zonas de la franja en tres categorías de crecimiento (Alto, Medio y Bajo).
- Ubicación de puntos de muestreo: de forma aleatoria, en cruz o en zig-zag se lanza un rectángulo de 1m² cuantas veces sea representativo para el área a muestrear. Es decir, a mayor área mayores lanzamientos y a menor uniformidad también mayor número de lanzamientos. La producción de pasto dentro del cuadro es calificada según el criterio del punto anterior (Alto, Medio o Bajo).
- De cada categoría se elige entre uno y tres lanzamientos, donde el contenido total de pasto se cosecha a ras de suelo. Luego se pesa el contenido de forma inmediata y se guarda la muestra para ser pesada después de un proceso de deshidratación, el cual permite que la BAP se exprese en términos de kilogramos de materia seca (KgMS).
- Posteriormente, se realiza un promedio ponderado de la producción aérea de pasto, usando como datos los pesajes directos y el número de observaciones realizadas por categoría.

Foto1: realización de aforo previo al pastoreo (foto cortesía Jorge Mario Noreña)



4.3. Selección de satélites e IV

Se eligieron los satélites Modis y Landsat para esta investigación. Primero que todo, porque estos satélites han sido utilizados para el monitoreo de cultivos, específicamente para pastos. El segundo criterio es que esos satélites son de acceso libre y gratuito, lo que implica que si se desea continuar con estos estudios y desarrollar una tecnología de monitoreo de praderas para Colombia, éste tenga los menores costos posibles.

Ya que la información espectral o las bandas de los satélites permiten el cálculo de determinados IV, se eligieron aquellos con mayor frecuencia de citación en la literatura científica: SR y NDVI. En cuanto al enfoque fisiológico, la investigación tuvo en cuenta los procedimientos de Grigera (2007), quien recoge las recomendaciones de Hill (2004) sobre escala y satélite. Ambos autores no usan los índices de área foliar de escala global planteadas Baret (2013), por las limitaciones que presenta.

La tabla 2 muestra la revisión de literatura, aquella que explica la utilización de estos satélites para el monitoreo de pastos mediante los IV mencionados.

Tabla 2. Relación de bibliografía específica para pastos e imágenes satelitales

| Bibliografía específica para pasturas | | | |
|--|------------|-------------------------------|---|
| Autor principal | Año | Índice de vegetación | Satélite |
| Archer | 2003 | NDVI | AVHRR |
| Hill | 2004 | NDVI | AVHRR (recomienda Modis) |
| Boschetti | 2006 | SAVI,MSAVI,OSAVI,NDVI,SR | Landsat |
| Grigera | 2007 | SR | Modis |
| Phillip | 2009 | SWIR, MSAVI | Áster, Landsat |
| Numata | 2010 | NPV,GV,NDVII5,NDVII7,NADVI,SR | Landsat (recomienda Áster, Hyperion, Modis) |
| Yu long | 2010 | NDVI | Modis |
| Edirisinghe | 2012 | NDVI | Spot |

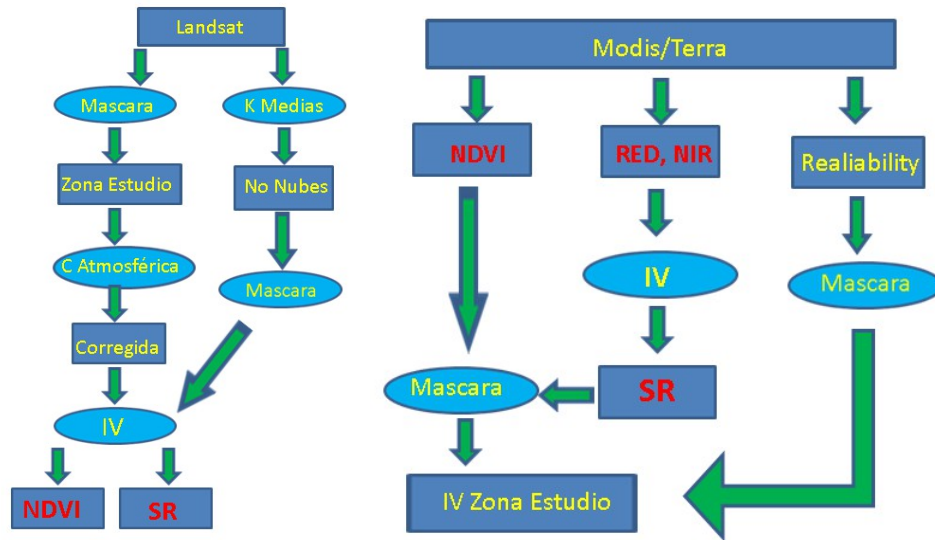
Para las imágenes del Modis se realizó la búsqueda del producto MOD13Q1 del satélite Modis/Terra, en la ubicación h10v8 que cubre el noroccidente de Colombia. Estas imágenes fueron adquiridas para las fechas entre 1 de mayo al 31 de diciembre del 2011, periodo de tiempo que cubre la temporalidad de la medición de BAP en campo.

Para la misma temporalidad, se realizó una búsqueda de imágenes Landsat como un máximo de nubosidad de 50% en la imagen, en las direcciones Path: 9, row: 55 y Path: 9, row: 56, correspondiente a la zona de estudio.

4.4. Calculo de NDVI y SR

El cálculo de los IV se realizó mediante el procedimiento que se muestra en la ilustración 3 y se describe en los siguientes numerales.

Ilustración 3 Esquema seguido para el tratamiento de imágenes Landsat y Modis



4.4.1. Corrección Atmosférica.

Las bandas que se usaron del satélite Landsat fueron B3 y B4. Se sometieron a corrección atmosférica por el método de sustracción de objeto oscuro, el cual consiste en estimar el nivel digital correspondiente a la dispersión por partículas y aerosoles de la atmosfera para restarla. Este método opera basándose en la identificación de objetos oscuros sobre el territorio como aguas profundas y claras, sombras y pavimentos de asfalto (ITT Corporation 2006). Para este caso, se identificaron 50 pixeles de los embalses de la Fe y de Riogrande II, que se encuentran dentro del área de estudio. Se usó el promedio de los niveles digitales de estos pixeles como parámetro en la opción Dark Subtract del programa Envi4.3.

4.4.2. Índices de vegetación.

Para las imágenes Modis el producto MOD13Q1 contiene un raster de NDVI. Para Landsat se usaron las bandas B3 y B4 correspondientes al rojo (0.63-0.69 um) y al infrarrojo cercano (0.76-0.90um), con esta información se aplicó la ecuación 1 descrita en el numeral 3.1.3. que aquí se repite.

$$NDVI: (\rho NIR - \rho R) / (\rho NIR + \rho R)$$

Dónde: ρNIR es el nivel digital de la banda del espectro óptico que corresponde a la longitud de onda del infrarrojo cercano. Y ρR es el nivel digital de la banda del espectro óptico que corresponde a la longitud de onda del rojo.

El SR se calcula con los raster Red y NIR del producto MOD13Q1 en el Modis. Y en el caso de Landsat, con las mismas bandas B3 y B4 correspondientes al rojo

(0.63-0.69 μm) y al infrarrojo cercano (0.76-0.90 μm). Con esta información se aplica la ecuación 2 descrita en el numeral 3.1.3 y que aquí se repite.

$$SR: \rho_{NIR} / \rho_R$$

Dónde: ρ_{NIR} es el nivel digital de la banda del espectro óptico que corresponde a la longitud de onda del infrarrojo cercano. Y ρ_R es el nivel digital de la banda del espectro óptico que corresponden a la longitud de onda del rojo.

Los raster resultantes fueron extraídos usando como máscara el polígono de los municipios de la zona de estudio. La fuente para la generación de este polígono fue el mapa de municipios de Colombia con escala de 1: 500.000 del Instituto Geográfico Agustín Codazzi (IGAC). Para Modis el resultado fue extraído por máscara usando la zona de estudio como ancho la escena y con tamaño de pixel igual a una imagen de Landsat. Esto realizó un re-muestreo al tamaño de pixel 30x30 y con el mismo origen de pixel de la imagen Landsat.

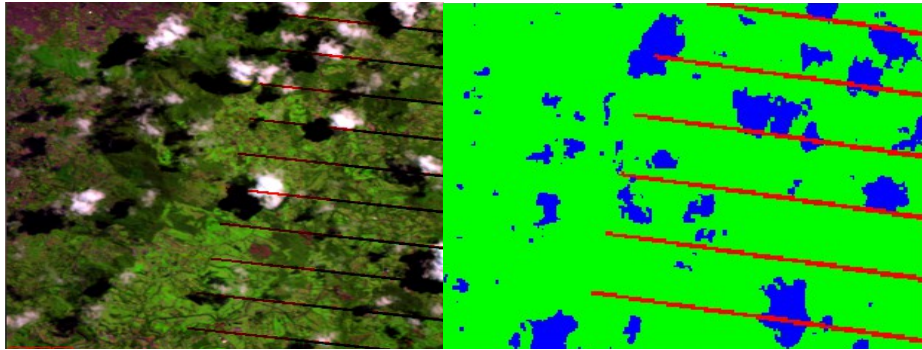
4.4.3. Máscara de pixeles válidos.

Solo se admitió el uso de los pixeles que en Landsat se categorizaron como no nubes y en Modis como admitidos. Este procedimiento se realizó mediante la generación de una máscara como se explica a continuación.

A través del software Envi 4.3, las imágenes Landsat se clasificaron los pixeles en tres categorías: nubes, no nubes y gaps y bordes. Esto se llevó a cabo mediante una máscara generada por la clasificación no supervisada K-means, cuyo principio fundamental es la clasificación de los pixeles en K número de clases por cercanía a sus medias (Smith 2013). La Ilustración 4 ejemplifica una imagen con los pixeles de nubes, no nubes y gaps. Posterior a este procedimiento, la imagen se recortó al tamaño de la zona de estudio.

Luego de recortar la zona de estudio en la imagen Modis, se usó el raster Realiability del producto MOD13Q1 para descartar pixeles. Este raster categoriza cada pixel en -1 para no dato, 0 dato optimo, 1 dato confiable, 2 dato asociado a hielo y 3 datos con nubes (Solano 2010). Para este caso, solo se admitió los datos de pixel ideal y confiable.

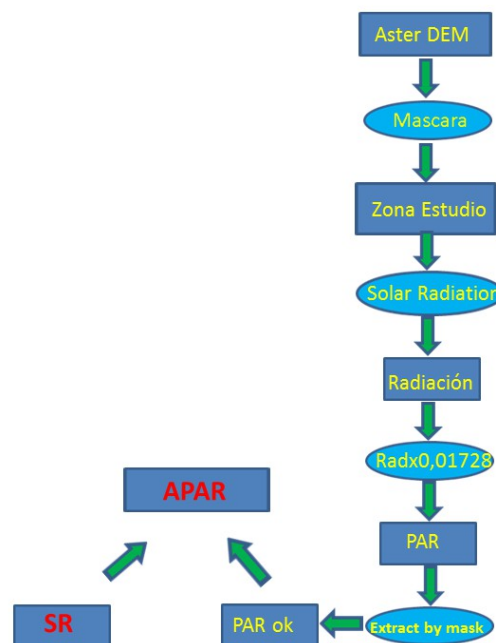
Ilustración 4 a la derecha combinación en falso color 5, 4, 3 dentro de la zona de estudio. Y a la izquierda nube (azul), no nube (verde) y gaps (rojo) de la misma área.



4.4.4. Cálculo de APAR

La ilustración 5 muestra el procedimiento general para el cálculo de APAR como representante del enfoque fisiológico. En los numerales siguientes describen el procedimiento ilustrado.

Ilustración 5 Esquema seguido para el cálculo de APAR



4.4.5. Radiación

Se partió del Modelo Digital de Elevación (DEM, por las siglas en inglés) Áster (GDEM Áster), cuyo pixel es de 30x30m y 15m en la vertical. Este fue recortado usando como mascara el polígono de los municipios de la zona de estudio, la fuente para la generación de este polígono fue el mapa de municipios de Colombia con escala de 1: 500.000, del Instituto Geográfico Agustín Codazzi (IGAC).

Con el DEM se calculó la radiación solar mediante la opción del software Arcgis 9.3 *Area Solar Radiation*, para los 60 días precedentes a las imágenes Landsat o Modis, según lo reporta Grigera (2007). Esta opción estima la radiación de

acuerdo con la posición de la tierra frente al sol, el grado de inclinación de la tierra frente a su propio eje y el DEM con una separación horaria de 0.5 horas durante el periodo definido. Para lo anterior, se consideró un modelo de difusión de radiación uniforme, el cual asume que las nubes interfieren de forma uniforme en todos los pixels de la imagen, lo que desconoce diferencias en la radiación de cada pixel. El resultando es un raster de la sumatoria de la radiación en Watts hora por metro cuadrado (WH/m^2) de los 60 días (ESRI 2013).

McCree (1972), proponen que las plantas asimilan el 48% de la radiación en términos de Mega Juls por hectárea (MJ/Ha). Teniendo en cuenta que $3.6MJ/m^2$ equivale a $1KWH/m^2$, cada raster se multiplica por 0.01728, realizando así la transformación de unidades entregadas por ArcGis 9.3 y haciendo la estimación del 48% de la radiación en un solo procedimiento. El raster resultante se denomina PAR (Radiación fotosintéticamente activa).

4.4.6. Remuestreo y APAR

Sobre el raster PAR se efectuó una extracción por mascara en ArcGis. El ancho de la escena y el tamaño del pixel correspondieron con la misma imagen utilizada para calcular el APAR (Landsat o Modis). Esto generó un remuestreo al mismo tamaño del pixel y al mismo origen. Mediante la calculadora raster se multiplicó el SR y su correspondiente PAR, teniendo como resultado APAR.

4.5. Correlación entre BAP e IV (SR y NDVI) y APAR

Para los predios Horizonte y Pulgarina no realizaron ninguno de los siguientes procedimientos, debido a que dichos predios se reservaron para un proceso de validación que será descrito más adelante.

El anexo 2 muestra los valores relacionados y la anexo 3 muestra los eventos encontrados para cada predio, es decir, las fechas de las mediciones de biomasa en campo y las imágenes satelitales válidas para los 13 predios restantes. Solo se usaron los IV y los APAR cuya diferencia no superaron 10 días entre la medición del BAP y la toma de la imagen satelital, esto debido a los principios fenológicos anteriormente desarrollado en el numeral 3.1.5. De esta manera, fue posible plantear que el cálculo del BAP se aproximó a los datos en el momento de la toma de las muestras.

Para las imágenes encontradas dentro del rango de tiempo señalado, se evaluaron la validez de las mismas respecto a la nubosidad, el número de pixeles contenidos en cada predio y la resolución espacial frente al tamaño de los predios. Se observó la distribución del valor de los pixeles de los distintos IV.

A los IV (SR y NDVI), los APAR y el BAP se les realizó las transformaciones potencia a la 2, raíz cuadrada y logaritmo natural. Después se correlacionaron las diferentes combinaciones de BAP y su transformación con los IV, los APAR y sus respectivas transformaciones. Lo anterior, tal como lo sugiere YU Long (2010), Edirisinghe (2012) y Mahmoud El Hajj (2009). De cada posible combinación de IV

y APAR se eligió las de mayor R^2 y se compararon, de estas correlaciones se construyeron las ecuaciones para la estimación de BAP.

4.6. Validación.

En los resultados obtenidos mediante la aplicación de las correlaciones, se procedió a evaluar su validez como predictor de BAP en fincas productoras de leche especializada mediante los siguientes pasos.

- Ecuaciones a evaluar:

Para las relaciones de mayor R^2 encontradas en el numeral 4.6, se procedió a la regresión lineal asociada, identificando la pendiente y la intersección con el eje Y. Con dicha información se generó una ecuación por cada relación identificada, donde el IV fue la variable de la cual se estime el BAP.

- Aplicación de ecuaciones:

Se calculó el NDVI, SR y APAR según los procedimientos descritos en el numeral 4.4 y 4.5. Posteriormente, se procedió a estimar el BAP con cada una de las ecuaciones generadas.

- Comparación de medias:

Para los dos predios que no se tuvieron en cuenta anteriormente, se les comparó el BAP obtenido en campo con los BAP estimados con las distintas ecuaciones. Se conservó el criterio de comparación, el cual plantea que son comparables los datos con una diferencia entre la muestra en campo y la imagen satelital no mayor a 10 días (los datos se encuentran en los anexos 4 y 5) .

Tanto el BAP real como los BAP de las ecuaciones se compararon mediante un análisis de Anova usando el paquete estadístico R, en el que previamente se cumplió con los criterios de distribución normal y homocedasticidad, éste último se refiere a que las muestras presentan similitud en la varianza. Posteriormente, se buscaron diferencias entre tratamientos mediante la prueba de Tukey. Este método de comparación se usa con la intención de buscar un equilibrio entre evitar el error tipo I y el error tipo II. Es decir, equilibra la posibilidad de no aceptar la hipótesis nula cuando es verdadera y no rechazarla siendo ésta falsa (Institute for Statistics and Mathematics 2013).

Se eligió la ecuación cuya media de BAP estimado resultó estadísticamente igual a la media de los valores de BAP obtenidos en campo.

4.7. Análisis a escala municipal de pastos

La ilustración 6 muestra el procedimiento que se usó para la BAP en el municipio de San Pedro de los Milagros. La secretaria de Agricultura de Antioquia facilitó el más reciente estudio de coberturas de la tierra realizado por el IGAC en el 2007.

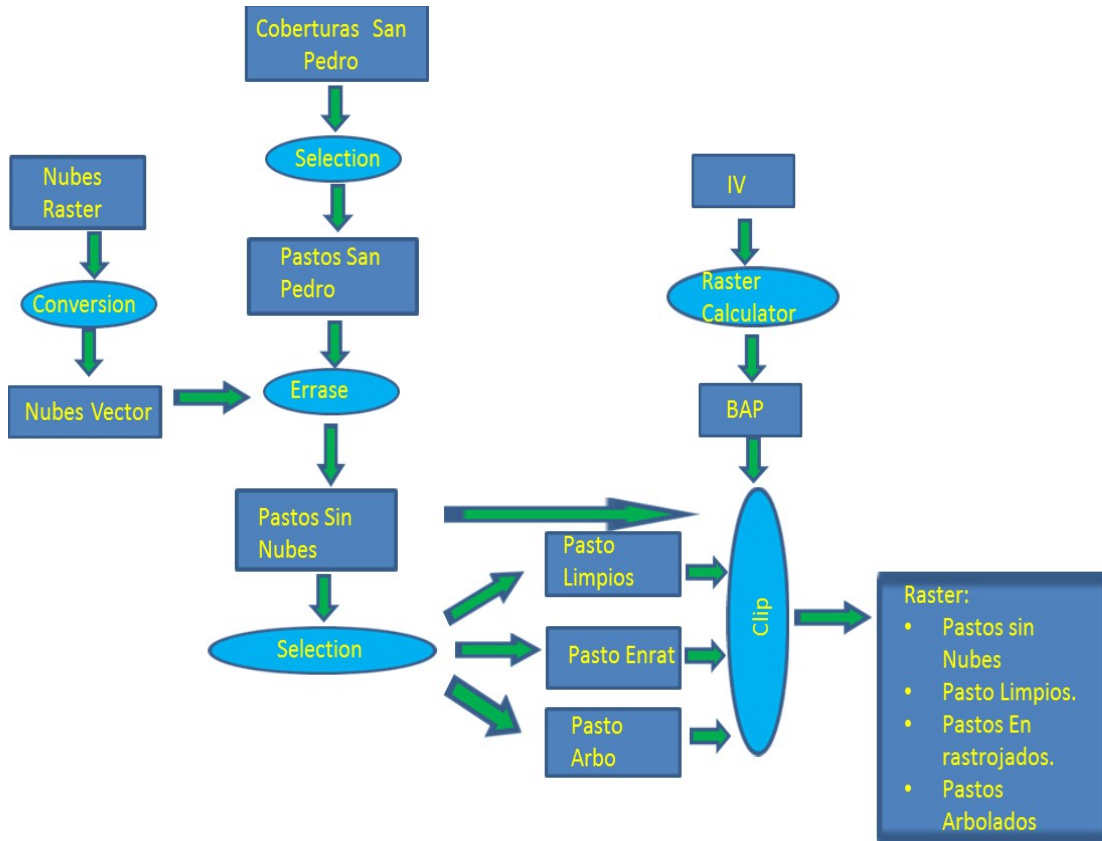
Éste se realizó mediante la metodología modificada Corine Land Cover que fue descrita anteriormente.

En el procedimiento de la ilustración 5 se usó el IV y las nubes como datos de entrada, para las imágenes Landsat (9-56) del 18 de diciembre de 2008. Esta imagen fue elegida por ser la más cercana al 2007, fecha la clasificación de coberturas suministrada por la Gobernación de Antioquia, y por tener una menor nubosidad.

Se compararon todas las pasturas como una categoría independiente: pastos limpios, pastos enrastrojados y pastos arbolados. Se realizó un análisis de medias mediante Anova y prueba de Tukey ajustado (pruebas con tratamientos con diferentes números de muestras TDK), usando para ello el paquete estadístico R (Institute for Statistics and Mathematics 2013) para identificar la productividad de los diferentes tipos de praderas.

Las categorías se escogieron bajo el criterio de que la transformación de la ganadería de pastos limpios y manejados propios de revolución verde (donde se enmarcan las fincas estudiadas) pueden tomar varios caminos: dejar de ser ganadería y no estar dentro del análisis, degradarse por procesos de abandono y pasar a ser pastos enrastrojados o transformarse según los intereses del PEGA (2006) y pasar a ser sistemas silvopastoriles.

Ilustración 6 Procedimientos en el análisis de BAP para el municipio de San Pedro De Los Milagros.



5. RESULTADOS Y DISCUSIÓN

A continuación se muestran los resultados encontrados mientras que son discutidos y contrastados con la literatura encontrada al respecto. En primer lugar se discute el BAP encontrado en campo. Es segundo término se discute los asuntos relacionados con la resolución temporal. En tercer lugar se expone lo encontrado alrededor de la resolución espacial. Posteriormente se discute las relaciones entre SR, NDVI y APAR con los datos de BAP en campo. Luego se discute lo encontrado en el proceso de validación y por último se muestra lo encontrado al análisis de municipal de San Pedro de los Milagros.

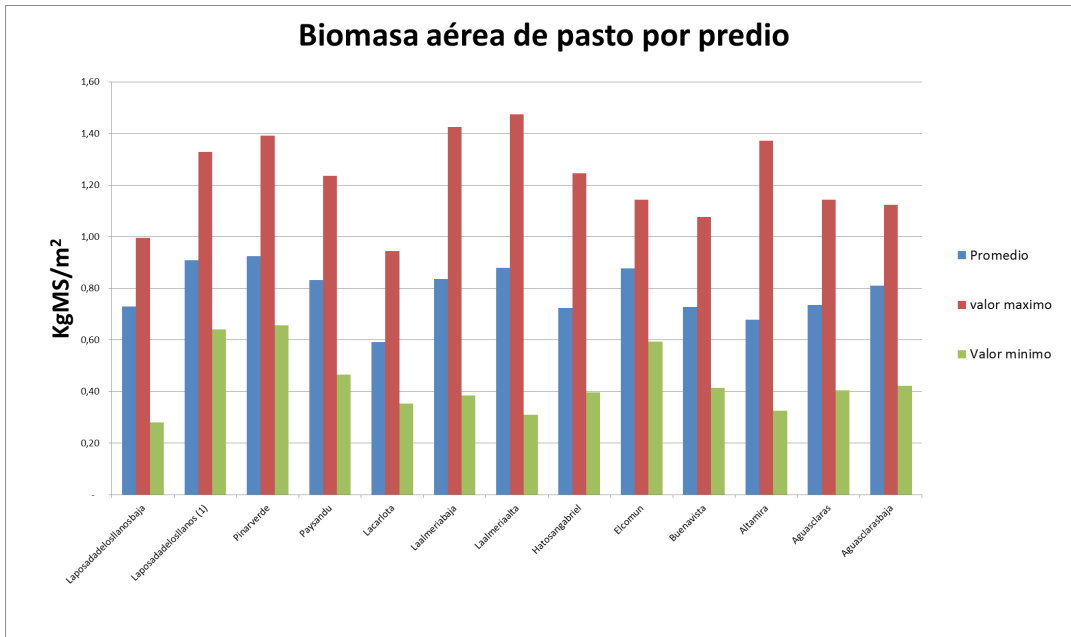
5.1. BAP en campo.

5.1.1. Niveles productivos

La Ilustración 7 muestra los valores de BAP antes del pastoreo, después del pastoreo y un promedio entre los dos eventos. En estos valores se evidencian los esquemas de manejo de las praderas, dado que existen diferentes niveles de producción máxima y mínima y que el promedio en algunas fincas se aproxima más al nivel máximo y en otros casos al nivel mínimo. Esta variabilidad cualitativa probablemente se debe a la presión del pastoreo, la fertilidad del suelo y a otras labores culturales como la fertilización y las fumigaciones.

Esto corresponde con lo reportado por Mendoza (2011), quien al caracterizar las praderas de trópico de altura en Colombia cita a Holmannet et al, (2003). Éste último señala que la variabilidad del consumo de forraje y de alimentos suplementarios concentrados de las producciones de leche de Antioquia y la Meseta Cundiboyacense es mayor, esto con respecto a Nueva Zelanda e Irlanda, donde la proporción de uso de los pasto va desde el 70% al 90%. Además, Mendoza (2011) dice que el sistema de pastoreo aplicado en los sistemas de leche especializada ha significado un avance en términos productivos, pero alerta las dificultades de ajustar las cargas animales generadas por las fallas en la estimación del forraje, provocando fincas con degradación de praderas por sobrecarga y predios con sobre oferta de forraje. Esto confirma que este estudio no se realizó con predios con características productivas específicas, como por ejemplo “fincas elites”.

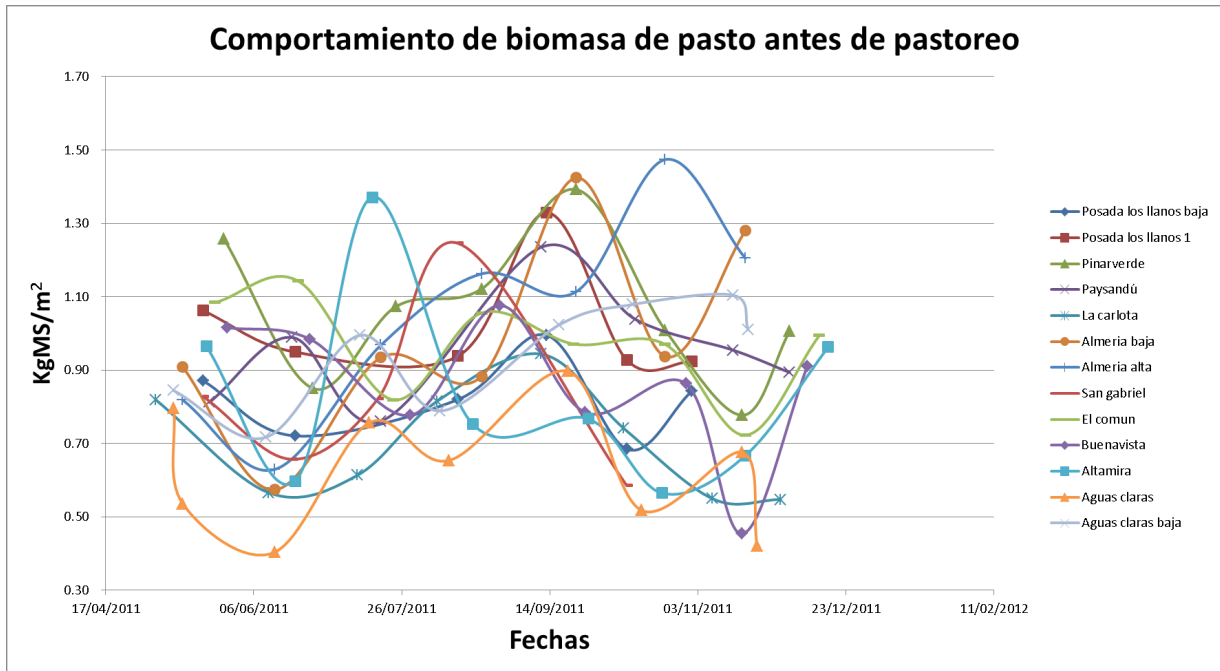
Ilustración 7 Biomasa aérea de pasto calculado en campo para cada predio (valores máximo, mínimo y promedio)



5.1.2. Estacionalidad de la producción.

La Ilustración 8 muestra los valores de BAP medidos en campo para cada predio a lo largo del periodo de estudio antes de cada pastoreo. En esta ilustración, pese a que se observa mayores valores de biomasa alrededor del mes de octubre, no se puede apreciar con certeza la variabilidad estacional que reporta Mendoza (2011). Él plantea que para las zonas lecheras de Colombia la variación del volumen de pasto está en función de la estacionalidad de las lluvias, ésta es mayor en épocas lluviosas con relación a las épocas secas. Probablemente esto se debe a que en un periodo menor de un año no se observa dicha variabilidad o que en el caso puntual de los predios evaluados el estrés hídrico no sea el factor limitante en la producción de pasto.

Ilustración 8 Biomasa aérea de pasto calculado en campo antes de pastoreo para a lo largo del tiempo para cada predio.



5.2. Imágenes.

5.2.1. Imágenes encontradas.

La tabla 3 muestra las imágenes que cumplen con el criterio de búsqueda señalado en la metodología. En la dirección h10v8 correspondiente al Modis, del total de las 13 imágenes posibles todas cumplieron con las condiciones establecidas. Para el satélite Landsat se hallaron 28 imágenes posibles, 14 en la dirección path: 9, row: 55 y 14 en la dirección path: 9, row: 56. Pero solo seis de ellas cumplieron con el criterio de búsqueda, 3 por cada una de las direcciones.

Tabla 3. Imágenes satelitales encontradas

| Imágenes encontradas | | |
|----------------------|-----------|------------|
| Satélite | Dirección | Fecha |
| Modis | h10v8 | 09/05/2011 |
| Modis | h10v8 | 25/05/2011 |
| Modis | h10v8 | 10/06/2011 |

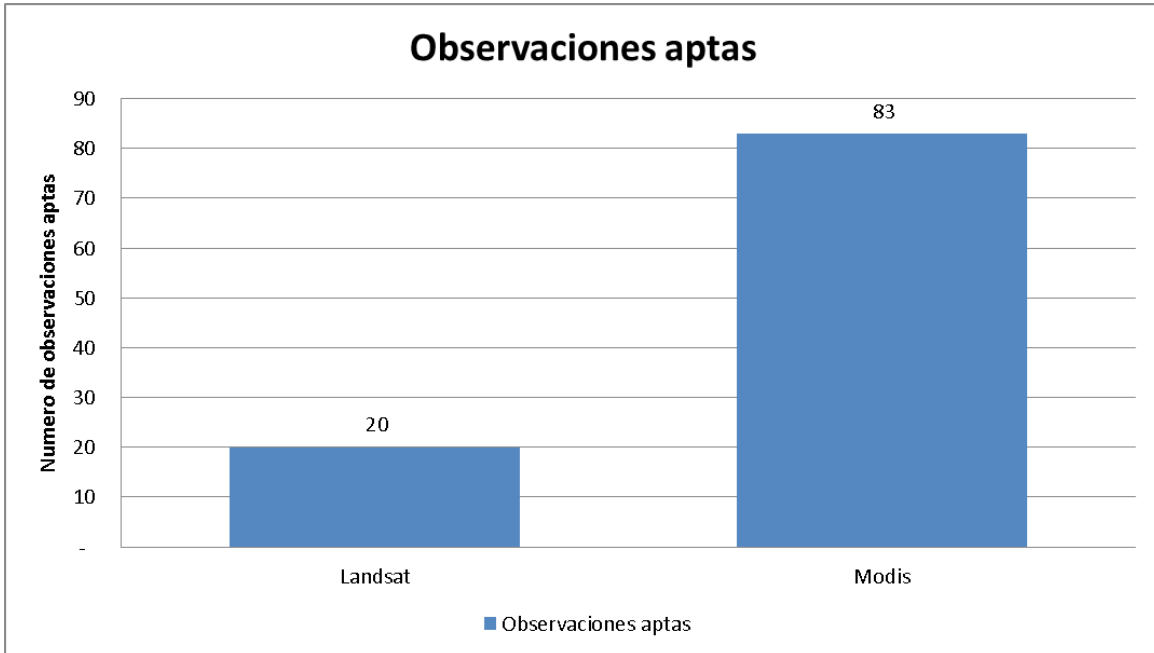
| | | |
|---------|----------|------------|
| Modis | h10v8 | 26/06/2011 |
| Landsat | P:9 R:56 | 03/07/2011 |
| Modis | h10v8 | 12/07/2011 |
| Landsat | P:9 R:55 | 19/07/2011 |
| Landsat | P:9 R:56 | 19/07/2011 |
| Modis | h10v8 | 28/07/2011 |
| Landsat | P:9 R:55 | 04/08/2011 |
| Modis | h10v8 | 13/08/2011 |
| Modis | h10v8 | 29/08/2011 |
| Landsat | P:9 R:55 | 05/09/2011 |
| Landsat | P:9 R:56 | 06/09/2011 |
| Modis | h10v8 | 30/09/2011 |
| Modis | h10v8 | 01/11/2011 |
| Modis | h10v8 | 17/11/2011 |
| Modis | h10v8 | 03/12/2011 |
| Modis | h10v8 | 19/12/2011 |

5.2.2. Observaciones prediales válidas.

La ilustración 9 muestra para el periodo de estudio la cantidad de observaciones validas de los predios, éstas son aquellas que en el Modis cumplen con la

clasificación del píxel explicada en la metodología y que en las imágenes Landsat no presentan nubes. En esta ilustración se aprecia que el satélite Modis tiene 63 observaciones más que Landsat para el mismo periodo.

Ilustración 9 Observaciones prediales aptas dentro del periodo de estudio.



El producto MOD13Q1 es construido con una imagen diaria del sensor Modis, haciendo para ello la corrección del dato de nube con los otros días donde si existe píxel válido. La calidad de cada píxel es entregada dentro del producto y cada usuario determina si ésta corresponde con los intereses que persigue (Maccherone 2013). En cambio, la imagen Landsat es el resultado de una única toma de imagen del sensor, lo que implica que si el píxel corresponde a una nube o a un gap (resultado del daño Scan Line Corrector), la imagen será entregada al usuario final con el píxel alterado y éste debe decidir entre no usarlo o generar mecanismos de corrección del dato con imágenes anteriores y/o píxeles vecinos.

Al no generar ninguna interpolación por no considerarlo adecuado por la variabilidad espacial y temporal de los cultivos de pasto, se renuncia al uso de varios píxeles. Esta frecuencia de los datos es discutida por Archer (2003) para series de tiempo de NDVI asociados a precipitación en contextos ganaderos, debido a que limita la frecuencia de los datos para análisis de series de tiempo a escala predial. Dorigo et al(2007) en su revisión de métodos de modelamiento de agroecosistemas, plantean que se debe tener en cuenta variables de los cultivos y su zonas, como por ejemplo las propiedades del suelo, las condiciones climáticas, los turnos de cosecha y las prácticas de manejo. La alternativa a la perdida de información por gaps o nubes es la interpolación del valor del píxel con información vecina o pasada. Sin embargo, Devendra Singh (2011) plantea en un estudio que las interpolaciones muestran menor correlación que los datos no interpolados.

Estas tres investigaciones alertan que esta limitación de píxeles aptos es vital para sistemas ganaderos, donde la frecuencia de pastoreo es de 37 a 60 días, lo que limita las imágenes Landsat para presentar información por cada pastoreo.

5.2.3. Resolución espacial.

El promedio del área en pasto de cada predio es de 4.46 Ha, en los cuales se encuentran valores desde 1.3 a 9.6 Ha, solo un predio tiene un tamaño mayor a 6.25 Ha correspondiente a un píxel de Modis. Un 61.55% de los predios tienen un píxel de Modis asociado, un 38.45% tienen dos píxeles, pero en ninguno de los casos está completamente contenido dentro del perímetro del predio. En cambio, los píxeles de Landsat completamente contenidos van desde 14 a 106 píxeles, lo que indica que podría monitorear la variabilidad de los estados fenológicos interno de cada predio.

Tabla 4 área productiva y número de píxeles contenidos

| Predio | Área productiva (Ha) | Píxeles Modis | Píxeles Landsat |
|---------------------------|-----------------------------|----------------------|------------------------|
| La posada los llanos baja | 5.47 | 2 | 61 |
| La posada los llanos (1) | 4.11 | 2 | 44 |
| Pinar verde | 5.81 | 1 | 65 |
| Paysandú | 4.23 | 1 | 48 |
| La carlota | 1.54 | 1 | 17 |
| La Almería baja | 2.03 | 1 | 24 |
| La Almería alta | 4.23 | 1 | 47 |
| Hato san Gabriel | 4.47 | 1 | 52 |
| El común | 4.67 | 1 | 47 |
| Buenavista | 6.12 | 2 | 66 |
| Altamira | 9.63 | 2 | 106 |
| Aguas claras | 4.78 | 2 | 56 |
| Aguas claras baja | 1.30 | 1 | 14 |

El problema de la escala es tratado por Hill et al (2004), quienes recomiendan migrar los procedimientos desarrollados en sus estudios del satélite AVHRR a Modis, dado que el primer satélite tiene una resolución espacial de 1.1Km, mientras que Modis tiene una resolución espacial de 250m. Por esta razón, Grigera et al (2007) desarrollaron su trabajo en Argentina en contextos de producción ganadera con información de Modis. Los autores no discuten asuntos de escala, asumen explícitamente que este sensor entrega información a la escala y frecuencia requerida por los ganaderos. Sin embargo, el artículo señala una diferencia sustancial con relación al contexto estudiado en esta investigación, al afirmar que el SIG construido tiene como unidad mínima los potreros y éstos son de más de 20Ha, donde el 75% de dichos potreros se le asocian 5 píxeles. Es decir, un solo potrero corresponde a más del doble del área destinada a ganadería en el predio de mayor tamaño que fue estudiado. Esto indica que Modis puede ser usado con más eficiencia en otros contextos ganaderos colombianos donde la

propiedad de la tierra es menos atomizada, como es el caso de la costa caribe y los llanos orientales.

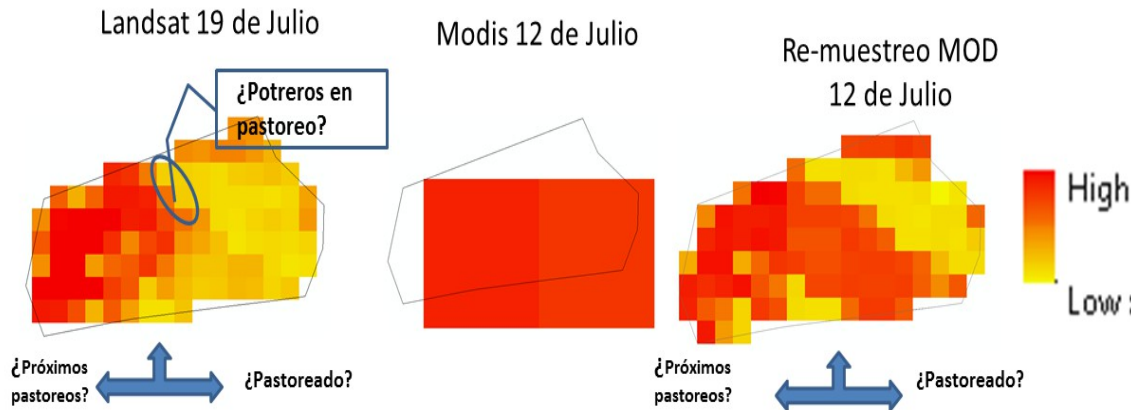
Por otra parte, Landsat tiene una escala adecuada para el monitoreo de gramíneas, tal como lo demostró Chenghai Yang et al (2011), al no encontrar diferencias significativas al comparar Spot5 (pixel 10m) y Landsat para la clasificación de cultivos en un territorio. El autor a pesar de no mencionar el tamaño de unidades productivas, las cataloga como predios atomizados con predominio de sorgo, caña de azúcar y algodón, los dos primeros gramíneas, al igual que los pastos.

Phillips et al (2009) reconocen los avances de Grigera, pero plantean que no son aplicables a su contexto norteamericano de alta intensidad. Allí la información de las praderas no solo debe limitarle a la biomasa, sino también debe incluir la oferta de nutrientes. Los tamaños de los predios van desde una hectárea hasta 20Ha, razón por la cual, usan información Landsat para relacionar la biomasa ofrecida a los animales y los datos de laboratorio de contenidos nutricionales (nitrógeno como indicador de proteína y TDN total Digestive Nutrient, como indicador de energía). En contextos de alta intensidad, que se aproximan más a la realidad de la zona de estudio, los norteamericanos usan imágenes Landsat, generando información que puede ser usada a nivel de campo, si se controla la presencia de arvenses. Esto confirma que Landsat puede ser usado para medir biomasa de pasto a nivel de pequeños predios como los estudiados, además sugiere que se debe avanzar en la evaluación de la oferta nutricional de dichos pastos.

Las diferencias de escala pueden ser apreciadas en la Ilustración 10, de forma cualitativa se muestra el predio Altamira en la fecha de 19 de julio para la imagen Landsat y del 12 de julio para la imagen Modis. Se observa que los pixeles de Modis no cubren el 100% del predio, dado que los otros pixeles que están sobre el predio no están contenidos en más del 50%. Además, los pixeles asociados no están completamente contenidos dentro del predio, lo que implica que la respuesta espectral de dicho pixel no solo está en función del predio estudiado, sino también de los predios vecinos. El objetivo de este estudio es analizar el nivel predial y no el del potrero. Sin embargo, también se puede observar la variabilidad interna de la biomasa aérea. En ambas imágenes puede verse un diferencial de biomasa dentro del predio, pero en la imagen Landsat se puede discriminar aún más esta diferencia, incluso llegando a la posibilidad de inferir los pixeles que están siendo pastoreados. Aunque el re-muestreo del Modis al tamaño de pixel 30x30 muestra también un comportamiento sub-predial, éste no visibiliza el detalle que se ve en la imagen Landsat.

Ilustración 10 Valor de APAR para el predio Altamira con los dos satélites.

APAR Altamira visto con dos satélites



5.3. Índices de vegetación NDVI, SR y APAR.

Las estadísticas descriptivas muestran los promedios y coeficientes de variación en los sensores Landsat y Modis, tal como se presenta en la tabla siguiente:

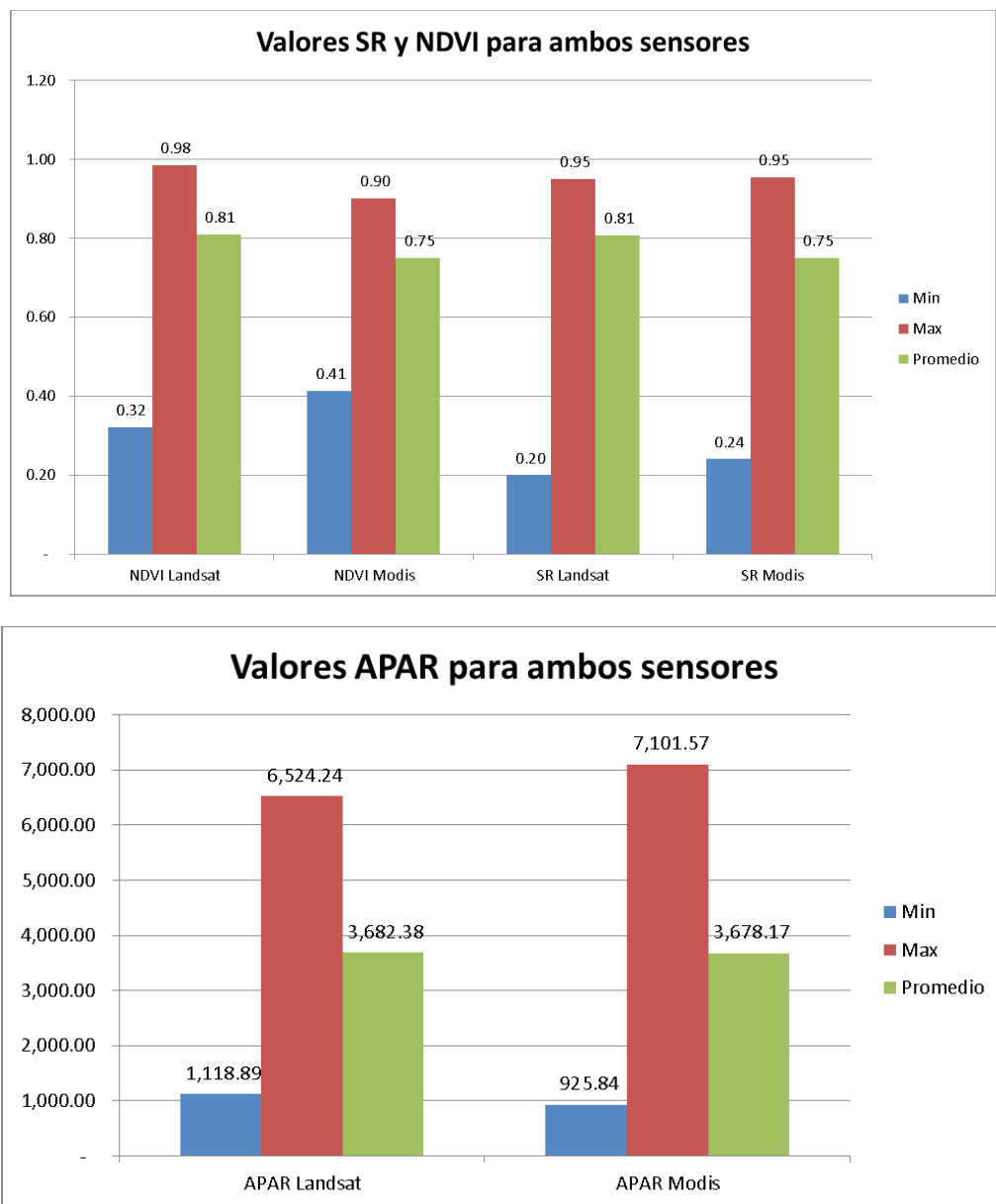
Tabla 5 Estadísticas descriptivas de SR, NDVI y APAR para los dos sensores.

| Sensor | IV | Promedio | Cv |
|---------|------|----------|------|
| Landsat | NDVI | 0.81 | 0,17 |
| | SR | 0.81 | 0.23 |
| | APAR | 3,682.38 | 0.45 |
| Modis | NDVI | 0,75 | 0.12 |
| | SR | 3,678 | 0.24 |
| | APAR | 5,405.34 | 0.37 |

En la ilustración 11 se observan los valores mínimos, máximos y promedio de los distintos IV, donde los rangos para Landsat son: 0.66 para NDVI, 0.75 para SR, y 5,405.34 para APAR. Los rangos para Modis son: 0.49 para NDVI, 0.71 para SR y 6,175.73 para APAR. Estos datos encontrados están dentro de los rangos

reportados en la literatura. Por ejemplo, Boschetti et al (2006), encontraron en los Alpes italianos el CV para biomasa en materia seca, el cual va desde 0.05 hasta 0.34.

Ilustración 11 Valores de pixeles NDVI, SR y APAR



5.4. IV vs Biomasa aérea de pasto

Los IV calculados (NDVI, SR, APAR) con sus respectivas transformaciones (Potencia a la 2, Raíz Cuadrada, Logaritmo natural), se relacionaron con el promedio por predio de BAP expresados en KgMS/m² y sus respectivas

transformaciones, generando las tablas 5 y 6 para Landsat y Modis respectivamente.

En Landsat (tabla5), se encontró que los R^2 van desde 0.16 hasta 0.65, los mayores valores correspondieron a APAR. A pesar que solo en el caso de NDVI se encontró que las transformaciones mejoraron el R^2 ($NDVI^2$), esta mejora no resultó superior.

La tabla 5 muestra en amarillo los valores de R^2 mayores para cada grupo de IV y BAP con sus respectivas transformaciones. Para el grupo de NDVI la mayor correlación fue de $NDVI^2$ Vs Raíz de BAP. Para el grupo de SR la mayor relación fue SR Vs LnBAP. Y para APAR el resultado más alto fue $APAR^2$ VS LnBAP. Es importante señalar que APAR Vs BAP también fue resaltada, esto debido a que las transformaciones no son tan superiores que justifique un descarte de esta relación y porque se desea la forma más simple de estimar la BAP por información satelital. Por lo tanto, esta relación justifica ser evaluada en el proceso de validación más adelante discutido.

Tabla 6 R^2 entre La producción de BAP ($KgMS/M^2$) y diferentes transformaciones, con IV y Transformaciones del Satélite Landsat

| R2 Landsat | | | | | | | | | | | | |
|------------|------|-------|----------|--------|------|------|--------|------|------|-------|----------|--------|
| | NDVI | NDVI2 | RaizNDVI | LnNDVI | SR | SR2 | raizSR | LnSR | Apar | Apar2 | raizApar | LnApar |
| BAP | 0.16 | 0.19 | 0.15 | 0.13 | 0.13 | 0.13 | 0.12 | 0.11 | 0.63 | 0.65 | 0.60 | 0.56 |
| BAP2 | 0.16 | 0.19 | 0.14 | 0.13 | 0.12 | 0.13 | 0.11 | 0.10 | 0.62 | 0.64 | 0.59 | 0.55 |
| raizBAP | 0.16 | 0.19 | 0.15 | 0.13 | 0.13 | 0.13 | 0.12 | 0.11 | 0.63 | 0.65 | 0.61 | 0.56 |
| LnBAP | 0.17 | 0.19 | 0.15 | 0.13 | 0.13 | 0.13 | 0.12 | 0.11 | 0.64 | 0.65 | 0.61 | 0.57 |

En cuanto a Modis, se encontró que sin excepción el R^2 resultó ser muy bajo, los más bajos (0.02) se obtuvieron para APAR y los menos bajos (0.08) corresponden a SR. Esto confirma las observaciones realizadas en la discusión de la escala, donde se recomienda limitar el uso de Modis a contextos ganaderos donde las unidades mínimas de análisis (sean potreros o predios) tengan mayor tamaño a los de este estudio.

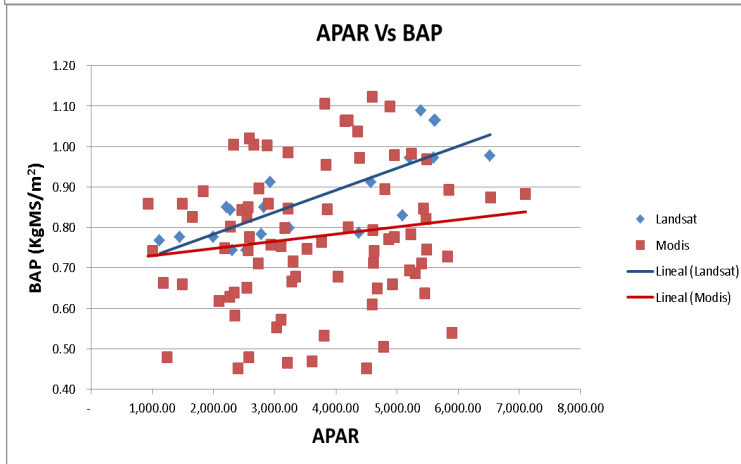
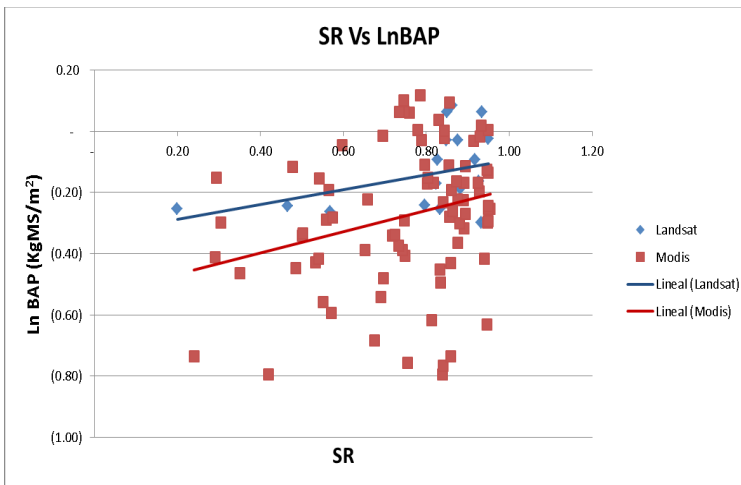
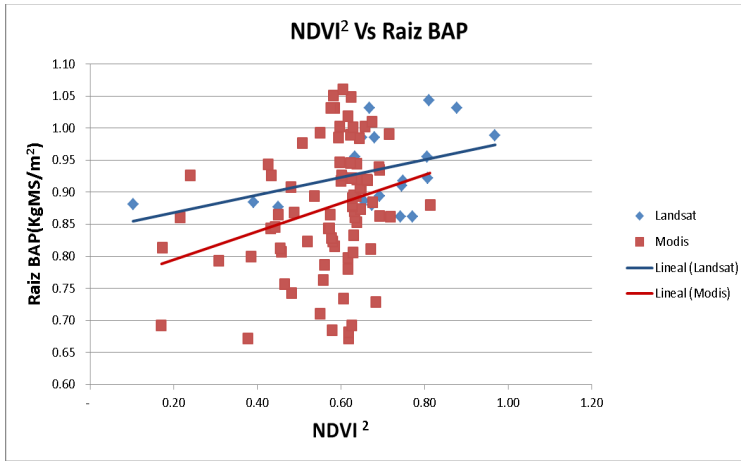
Tabla 7 R^2 entre La producción de BAP ($KgMS/M^2$) y diferentes transformaciones, con IV y Transformaciones del Satélite Modis.

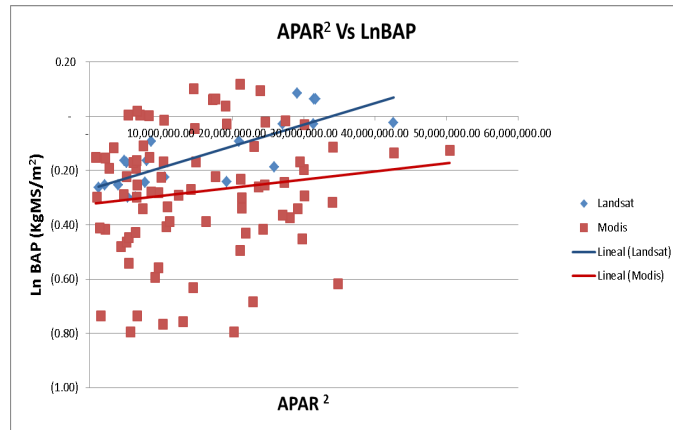
| R2 Modis | | | | | | | | | | | | |
|----------|------|-------|----------|--------|------|------|--------|------|------|-------|----------|--------|
| | NDVI | NDVI2 | RaizNDVI | LnNDVI | SR | SR2 | raizSR | LnSR | Apar | Apar2 | raizApar | LnApar |
| BAP | 0.07 | 0.07 | 0.07 | 0.07 | 0.07 | 0.07 | 0.07 | 0.07 | 0.02 | 0.02 | 0.02 | 0.02 |
| BAP2 | 0.07 | 0.07 | 0.07 | 0.06 | 0.07 | 0.06 | 0.07 | 0.07 | 0.02 | 0.02 | 0.02 | 0.02 |
| raizBAP | 0.07 | 0.07 | 0.07 | 0.07 | 0.07 | 0.07 | 0.08 | 0.08 | 0.02 | 0.02 | 0.02 | 0.02 |
| LnBAP | 0.07 | 0.07 | 0.07 | 0.11 | 0.07 | 0.07 | 0.08 | 0.08 | 0.02 | 0.02 | 0.02 | 0.02 |

La ilustración 12 muestra la relación entre los IV o sus transformaciones antes de ser resaltadas en la tabla anterior. Tanto en Landsat como en Modis, los IV y sus

transformaciones son variables independientes, mientras que la BAP y sus transformaciones son variables dependientes. Se confirma la alta dispersión de los datos de Modis con respecto a Landsat. Además, se observa que en las transformaciones de NDVI y en SR muchos datos pierden el comportamiento de su tendencia, a medida que es mayor IV. Esto se explica por el fenómeno de saturación del NDVI ante niveles altos de clorofila que reportan Ferwerda (2005), Schowengerdt (1997), Chuvieco (2000) y demás fuentes bibliográficas. Ese fenómeno parece ser corregido por la variable lumínica según Hills et al(2004). Este tema será retomado más adelante.

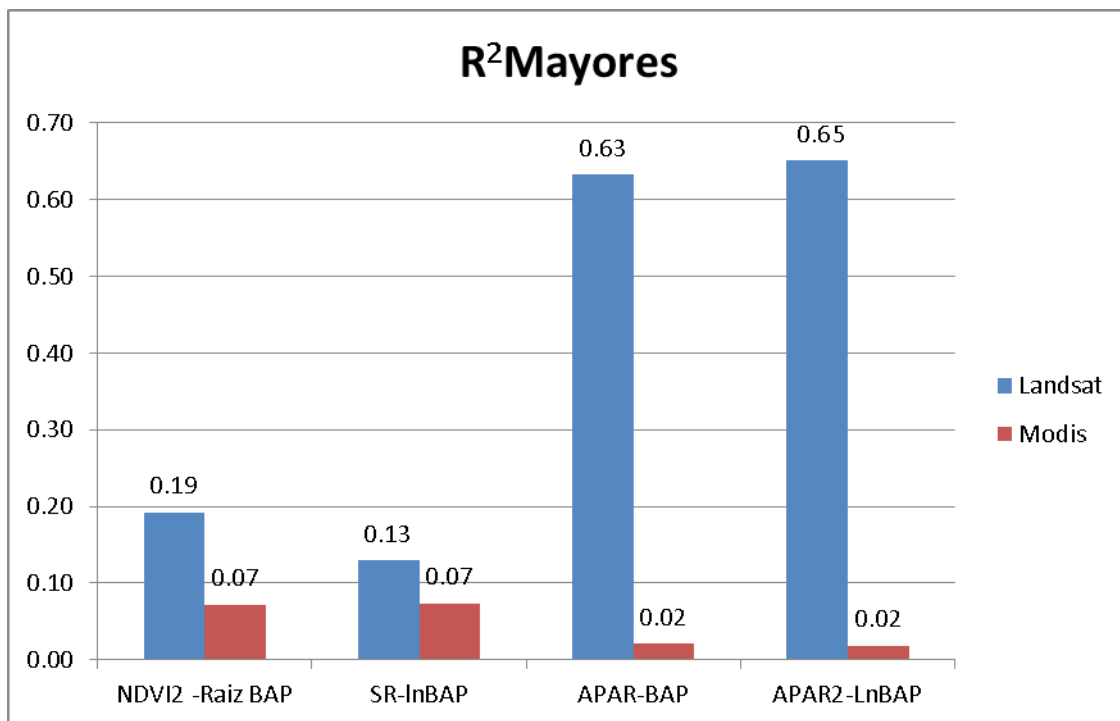
Ilustración 12 correlación lineal Biomasa aérea (KgMS/M²) con los IV de mayor correlación.





La ilustración 13 evidencia la superioridad del satélite Landsat en todos los IV, en cuanto a su relación con la biomasa aérea tal como se ha expresado antes, esto se debe a la escala de análisis usada. El APAR de Landsat resulta superior que SR y NDVI. El resultado descarta el uso de Modis para el estudio de la biomasa aérea a nivel predial en el contexto de la producción lechera del norte de Antioquia, donde la producción se basa en cultivos de predominio de pasto kikuyo (*Pennisetum clandestinum* Hoechst. Ex Chiov) y se lleva a cabo en predios con tamaños inferiores a 9.63 Ha.

Ilustración 13 Comparación de R² entre IV más altos en ambos Satélites.



Diferentes estudios han relacionado la biomasa con diferentes IV. Por ejemplo, Sakamoto et al (2010), usando información del Modis con una metodología que denominan de *dos pasos de filtrado*, diseñada para identificar estados fenológicos de maíz y soya; lograron tener R² de hasta 0.99 para estados fenológicos jóvenes,

disminuyendo progresivamente a medida que los cultivos maduran hasta un R^2 0.48 en cultivos próximos a cosecha. Mahmoud El Hajj et al(2009) diseñaron un sistema de modelación de cultivos de caña en Madagascar, una de las variables del modelo es el NDVI de imágenes Spot 5, que se relacionan con una transformación logarítmica del índice de área foliar medida en campo, encontrando un R^2 de 0.92.

Como se puede observar, los dos estudios mencionados no se dedican al estudio de la biomasa, sino a estados fenológicos e índices de área foliar. En cuanto a medición de biomasa en pastos, estos R^2 no son tan altos. Los reportes de mayor nivel los presenta Grigera et al (2007) para APAR, éstos son 0.82 y 0.74 para los dos tipos de pasturas que evalúa. Por otra parte, Hills et al (2004) obtuvieron valores de 0.67, 0.70 y 0.75 para los tres sitios donde desarrollaron su estudio, con un 0.69 para un cuarto lugar que sirvió de validación para su método, consistente en información satelital y el enfoque fisiológico usado posteriormente por Grigera et al (2007).

Cabe resaltar que estas dos experiencias cuentan con la característica de que el muestreo a nivel de campo fue muy estricto, consistió en el aislamiento de numerosos puntos de muestreo de $1m^2$ impidiendo la cosecha por parte de los animales con medición diaria del crecimiento, durante dos periodos de 5 semanas. Con otras formas de muestreo se obtuvieron menores R^2 . Por ejemplo, Boschetti et al (2006) realizaron 6 transeptos paralelos distanciados 100 metros en dos zonas distintas (4 transeptos para una zona y 2 para la otra), con medición geoposicionada cada 10 metros y cosecha total de $1m^2$, encontrando un máximo R^2 de 0.61 para SAVI (índice de vegetación ajustado por suelo). Similar forma de muestreo, con 16 transeptos de 100 metros cada uno usó Numata et al (2007), al estudiar varias características de las praderas, o más precisamente, parches de pasto en medio del amazonas brasilero y en condiciones latitudinales parecidas a las colombiana y usando imágenes Landsat. Ellos encontraron que el R^2 para biomasa más alto fue 0.38 para el IV NDVI5 (modificación del NDVI cambiando la banda 4 de Landsat por la banda 5 del mismo satélite). Edirisinghe et al (2012) plantea un procedimiento intensivo de tomas de datos en campo en transecto para relacionarlos con imágenes de Spot con pixeles $10m \times 10m$. Este consistió en realizar transeptos en zigzag garantizando 4 tomas de biomasa por cada pixel evaluado. YU Long (2010) para medir biomasa de pastos, usaron el NDVI del producto, con R^2 de 0.51 mediante un muestreo masivo de muchas variables productivas, entre las que se encontraba biomasa de pasto de una región china, pudiendo generar un análisis de degradabilidad de las praderas.

La forma de muestreo de este estudio fue la que tradicionalmente los ganaderos de la región desarrollan (ver el numeral 4.2). Esto implica valores de biomasa para cada predio y no el monitoreo específico de cada pixel. Esto sugiere que, al menos en el caso de APAR que cuenta con valores de R^2 de 0.65, puede dar idea del estado de las praderas en nuestro contexto, al menos comparativamente con los estudios de Hills et al (2004), Boschetti et al (2006), Numata et al (2007) y Yu

Long(2010). Pero también sugiere que si en estudios futuros se emplea otras formas de muestreo, esta correlación puede aumentar.

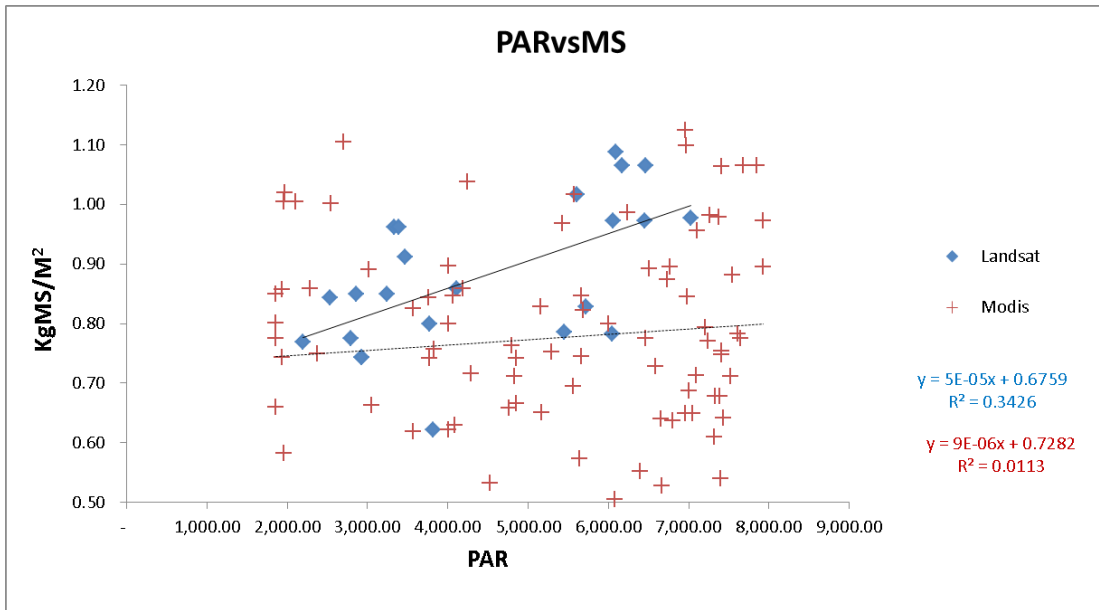
PAR representa el 48% de la radiación incidente, lo que muestra en el caso de Landsat una R^2 igual a 0.34. Lo que implica que además de la radiación incidente, la biomasa aérea de pasto está en función de otras variables como área foliar, fertilidad de suelo, entre otros. Modis presenta una relación muy baja, nuevamente evidenciando el tamaño de pixel como factor limitante.

El APAR, que relaciona la radiación solar (PAR) con el dosel (SR), muestra un mayor R^2 (ver Ilustración 13) que el PAR obtenido con ambos satélites, de 0.01 a 0.03 en Modis y de 0.34 a 0.66 en el caso de Landsat. Además, retomando lo discutido con la superioridad del APAR con relación a NDVI y SR, al corregir el fenómeno de saturación de clorofila, se muestra que el enfoque fisiológico para el uso de la luz es más apto que el enfoque del solo uso de IV para el monitoreo de pasto en medio de estudio.

A pesar de esto, se debe recordar nuevamente la forma de adquisición de los datos de PAR. En el caso de Hill et al (2004), tuvieron a disposición datos meteorológicos propios y la oportunidad de transformar los datos de la forma que desearan. Grigera (2007) adquirieron sus datos de radiación de forma gratuita con la estación Agro-meteorológica estatal en la región. Mientras datos de la tesis sobre radiación son estimaciones con el programa ArcGis 9.3 que se basa en la posición de la tierra frente al sol, el grado de inclinación de la tierra frente a su propio eje y un DEM del área de estudio.

Esto diferencia el estudio a los de Hills(2004) y Grigera(2007), al no considera las nubes dentro de su medición de PAR, generando un factor de error que en las latitudes de este contexto son altamente influenciadas por la zona de convergencia intertropical, Por este motivo, si se desea construir un sistema de vigilancia de praderas, éste deberá contar con datos de campo, o identificar la proporción de dicho error y buscar factores de corrección a la estimación de ArcGis 9.3.

Ilustración 14 correlación lineal Biomasa aérea (MS) con PAR tanto con Landsat como con Modis.



5.5. Validación

La regresión lineal antes realizada dio como resultado la tabla 8, donde se observa el R², la pendiente de la línea y la intersección con el eje Y.

Tabla 8: Elementos de la ecuación de la línea recta para IV derivados de Landsat

| Regresión Lineal | | | | |
|------------------|---------------|---------------|-------------|---------------|
| | NDVI2-RaizBAP | SR-InBAP | APAR-BAP | APAR2-LnBAP |
| R2 | 0.191735896 | 0.129584069 | 0.632032096 | 0.650283074 |
| Pendiente | 1.383740088 | 0.241844765 | 0.000054390 | 0.000000008 |
| Intersección | 0.840242027 | (0.335909703) | 0.674961243 | (0.269549550) |

Resultado de la tabla8, se generaron tres ecuaciones

Ecuación 3 BAPndvi

$$BAP_{ndvi} = (0.138564NDVI^2 + 0.840242)^2$$

Dónde:

BAP_{ndvi}: es la Biomasa Aérea de pasto calculada a partir de NDVI.

NDVI: es el IV NDVI calculado a partir de imágenes Landsat para el pixel de estudio.

Ecuación 4 BAPsr

$$BAP_{sr} = EXP^{(0.241845SR - 0.335910)}$$

Dónde:

BAP_{sr} : es la Biomasa Aérea de pasto calculada a partir de SR.

SR: es el IV SR calculado a partir de imágenes Landsat para el pixel de estudio.

Ecuación 5 BAP_{apar1}

$$BAP_{apar1} = 0.00005439 APAR + 0.674961$$

Dónde:

BAP_{apar1} : es la Biomasa Aérea de pasto calculada a partir de APAR.

APAR: SR calculado a partir de imágenes Landsat y 48% de la radiación estimada para el pixel de estudio.

Ecuación 6 BAP_{apar2}

$$BAP_{apar2} = EXP^{(0.000000007967 APAR^2 - 0.26955)}$$

Dónde:

BAP_{apar2} : es la Biomasa Aérea de pasto calculada a partir de APAR.

APAR: SR calculado a partir de imágenes Landsat y 48% de la radiación estimada para el pixel de estudio.

La aplicación de las fórmulas y los datos de campo se muestran en la tabla 6, que luego de pasar las pruebas de homocedasticidad y de normalidad se le aplicó la prueba de Anova (P= 0.05) descartando la hipótesis nula, por lo tanto al menos uno de los tratamientos es diferente.

Tabla 9 Biomasa Aérea de Pasto, medida en campo y por medio de las ecuaciones generadas.

| Biomasa Aérea de Pasto (Kg/m ²) | | | | |
|---|---------|-------|--------------|-----------|
| BAP | BAPNDVI | BAPSR | BAPAPAR 1 | PredAPAR2 |
| 0.88 | 0.80 | 0.81 | 0.87 | 0.84 |
| 1.12 | 0.89 | 0.89 | 1.07 | 1.15 |
| 1.12 | 0.89 | 0.89 | 1.09 | 1.21 |
| 1.00 | 0.88 | 0.89 | 1.02 | 1.05 |
| 1.03 | 0.88 | 0.88 | 0.99 | 0.99 |
| 1.03 | 0.92 | 0.90 | 1.01 | 1.04 |
| 0.89 | 0.85 | 0.85 | 0.84 | 0.83 |
| 0.93 | 0.87 | 0.86 | 0.86 | 0.83 |

La prueba de Tukey nos muestra que los datos de campo presentan una diferencia significativa con el BAP calculada a partir de NDVI, SR y APAR sin transformaciones, pero no encuentra diferencias con la transformación de APAR estimado con la ecuación 6.

Esto confirma la superioridad del enfoque ecofisiológico de uso de la luz, frente al uso de IV únicamente y define a la ecuación 5 como la más adecuada para estimaciones de BAP con información satelital.

Tabla 10: prueba Tukey para BAP

| Tukey | | |
|--------|--------------|-------|
| Grupos | Tratamientos | Media |
| a | Msprom | 1.00 |
| c | BAP-NDVI | 0.87 |
| c | BAP-SR | 0.87 |
| ab | BAP-APAR1 | 0.97 |
| ab | BAP-APAR2 | 0.99 |

5.6. Análisis de pasturas a escala municipal de San Pedro de los Milagros

Tanto Grigera et al (2007) como Hillis et al (2004) para usar sus estudios a escala territorial requieren una clasificación de coberturas como insumo de entrada, esto debido a lo dinámico que las coberturas pueden llegar a ser por factores macroeconómicos y productivos. Argumentando esto Kurtz (2010) desarrolla una clasificación de imágenes satelitales para la clasificación de coberturas con imágenes satelitales en contextos de la ganadería argentina.

En nuestro medio, donde los productores, los medios de comunicación y los entes gubernamentales coinciden en identificar lo frágil de la producción láctea, es fundamental replicar estudios como los de Kurtz. Por otra parte, esto limita un análisis territorial a las fechas cercanas al último estudio de coberturas de la región con la que cuenta la gobernación de Antioquia, estudio que a pesar de lo poco actualizado es con el que realiza toda la planeación del territorio a la fecha.

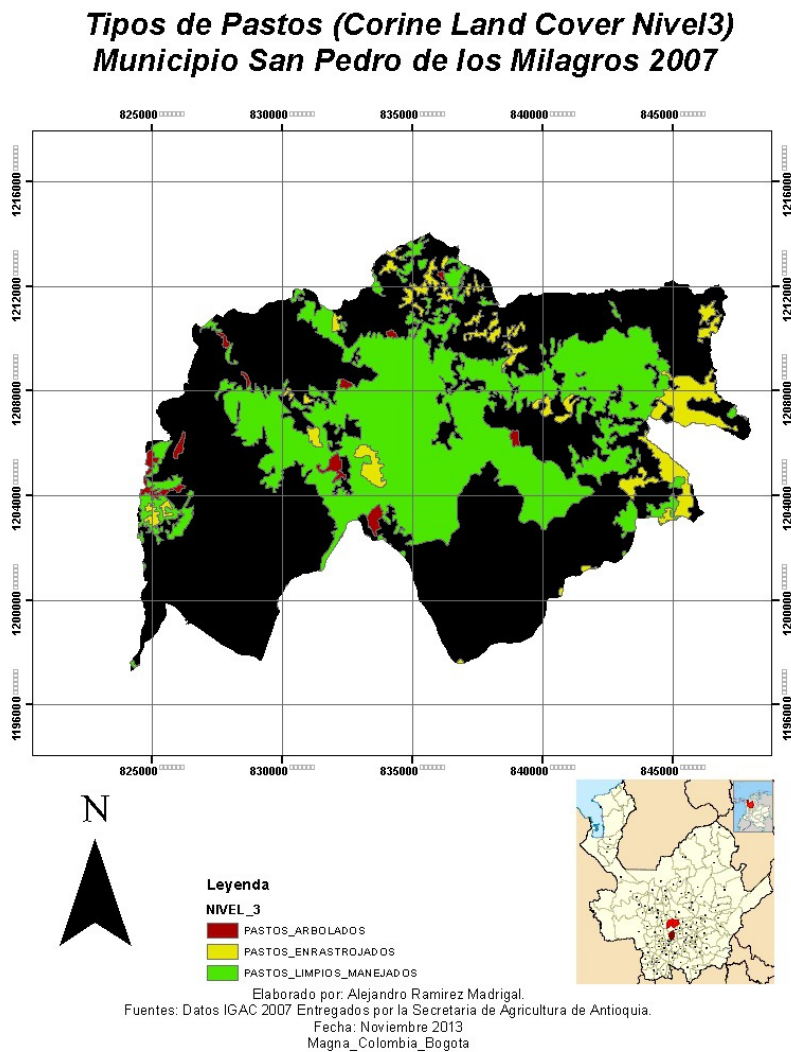
Los análisis multitemporales generados por YU Long (2010), donde a partir de imagen Modis lograron identificar procesos de degradación de praderas, solo son posibles si previamente se tiene la certeza de saber si una cobertura presente, en el pasado fue pasto y conocer la carga animal, como ellos lograron saber por medio de grandes campañas de medición en campo y de encuestas agrarias.

Algún grado de certeza se puede alcanzar para conocer los ecosistemas y las coberturas para cualquier contexto por medio de clasificación de imágenes Landsat, por ejemplo Lucas (2007), para generar mapas de coberturas y ecosistemas del Reino Unido; usó una serie de imágenes de un año, donde para regiones homogéneas se tenían predicciones superiores del 80%, y señala que las áreas con mosaicos y las praderas mejoradas tenían menos precisión. Sin

embargo, el estudio de Kurtz (2010) muestra que es posible monitorear cambios de coberturas específicas para pastos. Dado que su estudio se realizó en una región ganadera y su cobertura de estudio fue específicamente pasturas, encontrando 26 tipos de coberturas donde casi la mitad son diferentes categorías de pastos.

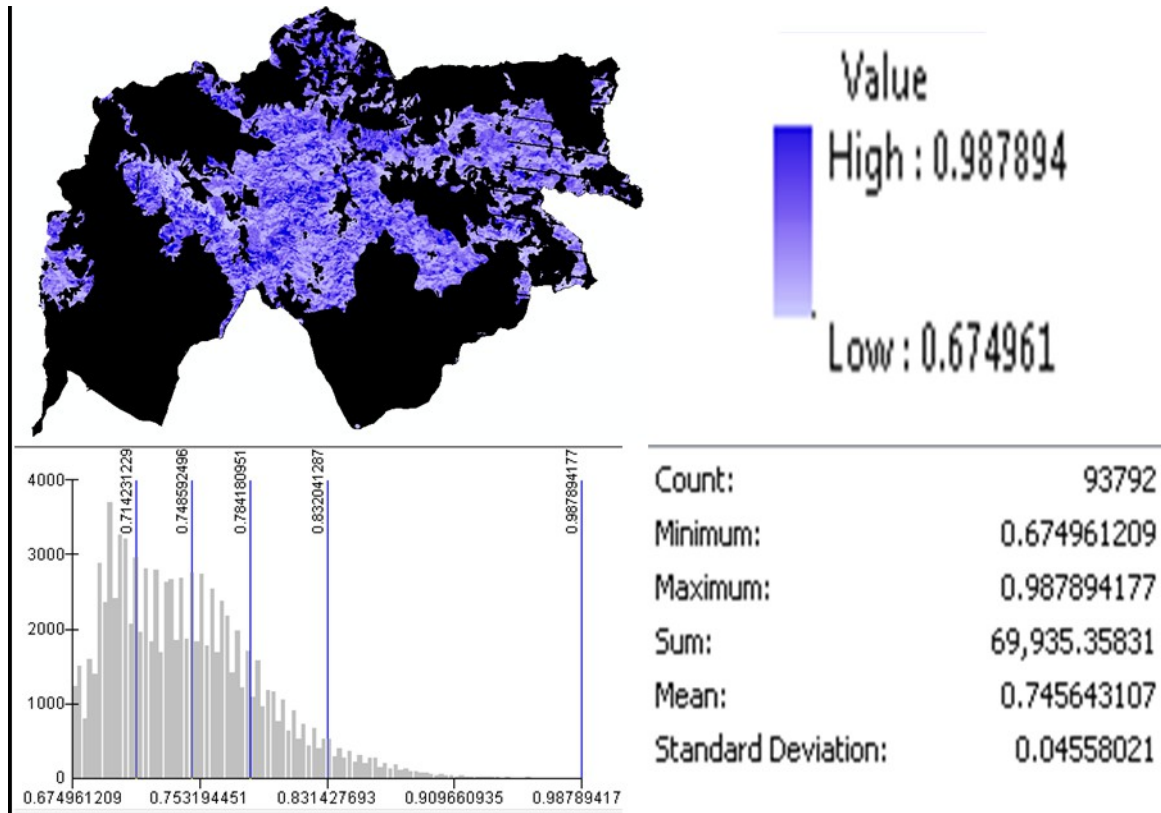
Esto muestra que la limitante de monitoreo de coberturas de pasto a lo largo del tiempo tiene posibilidades de monitoreo satelital constante y eficientes, sin tener la necesidad de someterse al limitante de esperar las actualizaciones de los estudios de coberturas oficiales, que en un eventual sistema de monitoreo de praderas serían de baja frecuencia. La ilustración 16 presenta los pastos de San Pedro De Los milagros, basado en el estudio de coberturas mencionado.

Ilustración 15 Tipos de pastos (Corine Land Cover Nivel 3) San Pedro de los Milagros. Para el año 2007



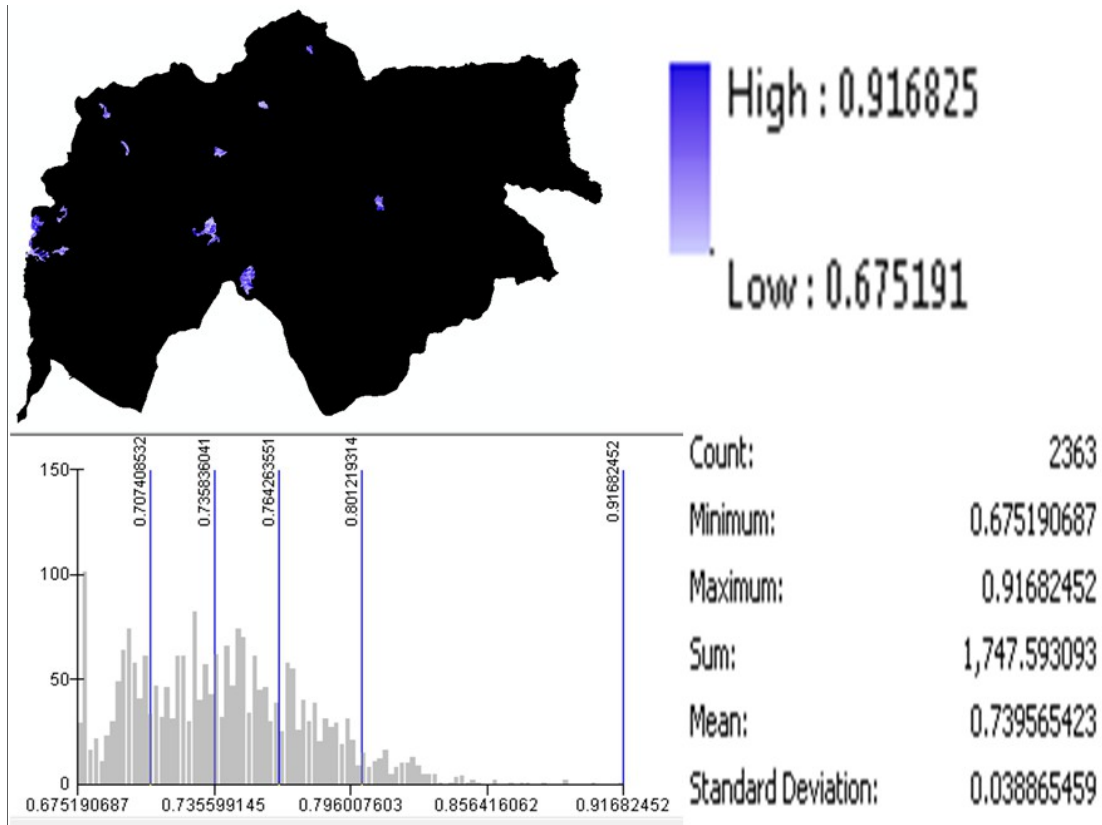
La ilustración 16 muestra el BAP calculado con la ecuación 5 para los pastos del municipio de San Pedro de los Milagros para el 18 de diciembre de 2008. En la imagen se puede apreciar la variación en la distribución de los 93792 pixeles, que van desde 0.6749 kgMS/m² hasta 0.9879 kgMS/m² con media en 0.7456 y los datos se ven concentrados a la izquierda.

Ilustración 16 BAP de los pastos del municipio de San Pedro de los milagros.



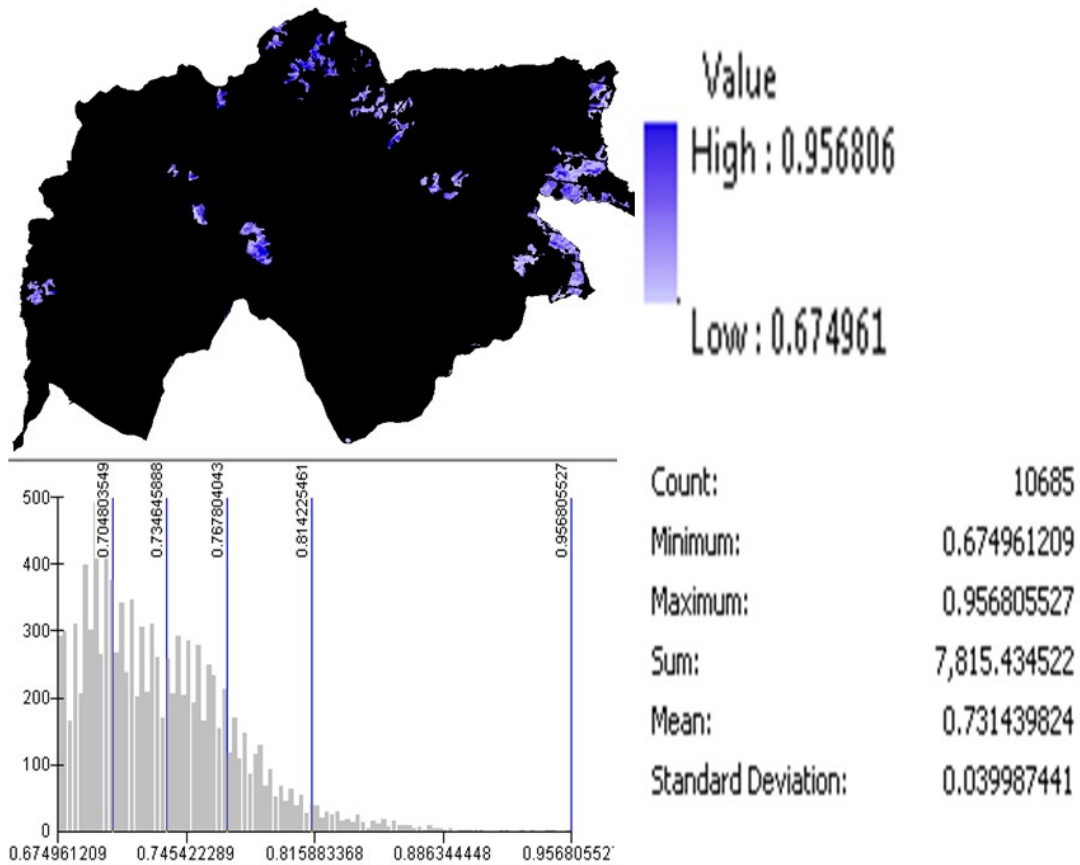
La ilustración 17 muestra el BAP calculado con la ecuación 5 para los pastos arbolados del municipio de San Pedro de los milagros para el 18 de diciembre de 2008, esta cobertura representa lo más parecido en la cartografía a sistemas silvopastoriles, donde además de pasto para ser usado en ganadería, existen árboles que prestan servicios ecosistémicos y generan microclimas favorables para la propia ganadería. En la imagen se puede apreciar la variación en la distribución de los 2363 pixeles, que van desde 0.6751 kgMS/m² hasta 0.9168 kgMS/m² con media en 0.7395 kgMS/m².

Ilustración 17 BAP de los pastos arbolados del municipio de San Pedro de los milagros.



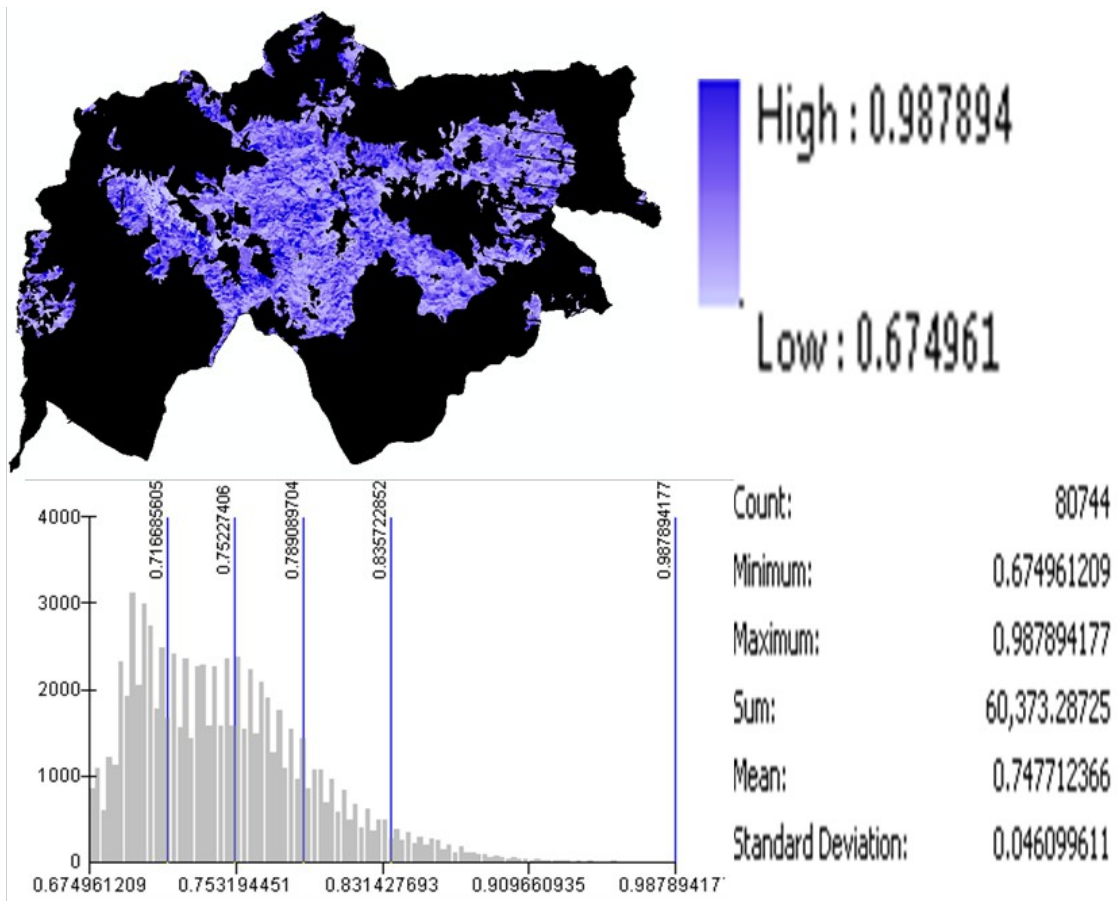
La ilustración 18 muestra el BAP calculado con la ecuación 5 para los pastos enrastrojados del municipio de San Pedro para el 18 de diciembre de 2008, esta cobertura representa una ruta de abandono de la actividad ganadera; posiblemente esta cobertura no esté asociada a la actividad ganadera o asociada a ganaderías extencivas o predios que posteriormente serán otras coberturas como son usos agrícolas, plantaciones forestales o bosques en estados sucesionales tempranos (rastros en clasificación Corine Land Cover). En la imagen se puede apreciar la variación en la distribución de los 10685 píxeles, que van desde 0.6749 kgMS/m² hasta 0.9568 kgMS/m² con media en 0.7314 kgMS/m².

Ilustración 18 BAP de los pastos Enrastrados del municipio de San Pedro de los milagros.



La ilustración 20 muestra el BAP calculado con la ecuación 5 para los pastos Limpios y manejados del municipio de San Pedro para el 18 de diciembre de 2008. Esta cobertura representa el paquete tecnológico de revolución verde representativo de la ganadería lechera de la región, representado, como se puede apreciar en la ilustración 16, el 86% de los pastos del municipio. Cabe recordar que si bien San Pedro no es el municipio de mayor producción de leche total, sí es el municipio con mayor producción de leche por vaca en un día (ver numeral 4.1). En la imagen se puede apreciar la variación en la distribución de los 80744 pixeles, que van desde 0.6749 kgMS/m² hasta 09878 kgMS/m² con media en 0.7477 kgMS/m².

Ilustración 19 BAP de los pastos limpios y manejados del municipio de San Pedro de los milagros.



La tabla 8 muestra la comparación de medias por el método de Tukey ajustado (TDK), donde observa que los pastos limpios tienen mayor media que los pastos arbolados y estos a su vez con los pastos enrastrados.

Tabla 11: Comparación de medias por el método Tukey ajustado (TDK).

| Comparación de medias | | |
|-----------------------|--------|---|
| Pasto | Media | |
| Limpios y manejados | 0.7477 | a |
| Arbolados | 0.7396 | b |
| Enrastrados | 0.7396 | c |

Giraldo et al 2009, reporta que en sistemas silvopastoriles en nuestra misma zona de estudio, la producción de pasto es menor que en sistemas tradicionales (de revolución verde). Donde para un sistema de 625 árboles en una hectárea la producción de pasto se disminuyó en 49.55% y con 278 árboles /ha se disminuyó en 22.77%; esto se explica por la alteración de la radiación recibida por el pasto bajo el dosel de los árboles. Los resultados encontrados en este estudio muestran

que la BAP en pasturas limpias manejadas es superior a pasturas arboladas, pero no en la misma proporción que lo reportado por Giraldo et al (2009), esto probablemente es debido a que en el pixel no muestra la respuesta espectral específica del pasto, sino que incluye la respuesta del pasto junto con los árboles. Vale la pena preguntarse, cómo varía el nivel digital de cada pixel en función de la densidad de árboles y especies de la misma. En ese sentido, por la cantidad de arreglos espaciales de sistemas silvopastoriles, es pertinente generar un procedimiento semejante a este para sistemas silvopastoriles representativos de la región, máxime cuando el arreglo espacial determina la cantidad de sombra que recibe el pasto y por lo tanto altera el APAR.

En cuanto a los pastos enrastrados en comparación de los pastos limpios y manejados, se observa una evidente diferencia a favor de los pastos manejados, esto coincide con el trabajo de Cajas et al (2012) donde plantea que las praderas renovadas, es decir, que se les somete a un proceso de manejo donde la pradera recobra condiciones físicas para la producción, produce 1.5 veces más que praderas a las cuales no se les realiza ningún tipo de manejo de renovación. Aunque los datos encontrados en este trabajo no muestran esa proporción, se puede ver en los histogramas de frecuencia mayor proporción de valores bajos en praderas enrastradas frente a pastos manejados. También vale la pena recordar que Cajas et al (2012) no solo señalan la diferencia de biomasa, sino también una notable diferencia nutricional, que probablemente y basado en el trabajo de Phillips et al (2009) mencionado anteriormente, dicha diferencia nutricional podría alterar la respuesta espectral.

El análisis territorial de BAP, muestra las diferencias esperadas entre las tres categorías de praderas, donde BAP de pastos limpios es mayor que la de pastos enrastrados, pero presenta dificultades con los pastos arbolados debido a que si bien muestra la respuesta esperada del componente herbáceo, no podemos alcanzar a identificar la influencia del componente arbóreo en la respuesta espectral del pixel.

Para pastos arbolados, representantes en este caso de los sistemas silvopastoriles, el componente de densidad de árboles y especie de los mismos debe ser evaluado, dado que esto podría alterar la respuesta espectral del pixel así como la cantidad de radiación recibida por el pasto, alterando el APAR.

6. CONCLUSIONES

La BAP encontrada para los predios estudiados evidencia un comportamiento productivo que se puede considerar como normal, es decir, no se tratan de fincas elite en producción, donde se observan sobre pastoreos y sub-pastoreos vistos en la diferencia entre el nivel máximo, mínimo y promedio de la BAP.

Aunque se observa una tendencia a tener mayores niveles de BAP en el mes de octubre, no se puede concluir que se trata de una tendencia de estacionalidad de la producción de pasto como se reporta en la literatura, esto debido, posiblemente al corto rango de datos con el cual se cuenta.

Dadas las restricciones de búsqueda de imágenes y la naturaleza de las imágenes usadas, se encontraron 13 imágenes Modis frente a 6 imágenes Landsat, esto se traduce en 63 observaciones prediales más de Modis que de Landsat, esto se traduce en una limitante de Landsat para el monitoreo de pastos dadas las exigencias fenológicas de estos cultivos.

El tamaño de pixel de Modis no corresponde a las necesidades de escala de la ganadería lechera de Antioquia.

Landsat resulta ser promisorio para el monitoreo predial y posiblemente sub predial de la ganadería lechera de Antioquia.

Landsat muestra la posibilidad de iniciar indagaciones por la variabilidad interna de la BAP, aunque Modis con el re-muestreo a pixel de 30x30 y la variabilidad del DEM también muestra estas tendencias, no cuentan con el detalle de Landsat.

En Landsat las relaciones entre información satelital y BAP más altas son: Para el grupo de NDVI la mayor correlación fue de $NDVI^2$ Vs Raíz de BAP. Para el grupo de SR la mayor relación fue SR Vs $\ln BAP$. Y para el grupo de APAR fue $APAR^2$ VS $\ln BAP$. También es de destacar APAR Vs BAP.

En Modis las relaciones entre información satelital y BAP fueron bajas para todos los casos, siendo las más bajas todo el grupo de APAR y las menos bajas SR.

NDVI y SR pierden el comportamiento de su tendencia a medida que es mayor IV, esto probablemente al efecto de fenómeno de saturación ante niveles altos de clorofila.

El R^2 de APAR obtenido con información Landsat resulta comparable con otras correlaciones reportadas por la literatura, lo que resulta prometedor a la hora de buscar llevar este estudio a la generación de una tecnología.

La ecuación $BAP_{apar1} = 0.00005439 APAR + 0.674961$ resulta más adecuada para estimar BAP con información Landsat.

Landsat resulta muy atractivo para el monitoreo de praderas en el contexto de ganadería de leche especializada del norte de Antioquia, donde predomina el pasto kikuyo (*Pennisetum clandestinum* Hoehst. Ex Chiov.) y los predios son de tamaños pequeños (en este caso menor a 9ha); además, se plantea la promesa de permitir monitorios a nivel subpredial. Sin embargo, Landsat presenta limitaciones para entregar información con la frecuencia necesaria a nivel de finca, esto debido a la influencia de nubes.

Modis no presentó utilidad para el contexto de la ganadería de leche especializada del norte de Antioquia, sin embargo esto no implica un descarte del uso de esta herramienta para Colombia, puesto que la limitación de tamaño predial no se presenta en otros contextos ganaderos como la costa norte colombiana y los llanos orientales.

El análisis municipal de BAP, muestra las diferencias esperadas entre las tres categorías de praderas, donde BAP de pastos limpios es mayor que la de pastos enrastrados, pero presenta dificultades con los pastos arbolados debido a que si bien muestra las respuestas esperadas del componente herbáceo, no podemos alcanzar a identificar la influencia del componente arbóreo en la respuesta espectral del pixel.

Para pastos arbolados, representantes en este caso de los sistemas silvopastoriles, el componente de densidad de árboles y especie de los mismos debe ser evaluado con mayor detalle, dado que esto podría alterar la respuesta espectral del pixel así como la cantidad de radiación recibida por el pasto, alterando el APAR.

7. RECOMENDACIONES

El enfoque fisiológico de uso de la luz resultó ser más eficiente que el enfoque de IV únicamente. Por lo tanto se sugiere continuar por este camino.

Para mejorar las ecuaciones de BAP se sugiere usar otros modelos de monitoreo en campo como son los análisis de transepto en fechas puntuales o el monitoreo de puntos de control aislados.

Se sugiere mejorar la adquisición del dato de PAR, esto se puede hacer por dos vías: tomas de radiación en campo, o mejorar el algoritmo de medición de radiación de ArcGis 9.3 planteando un factor de corrección que involucre influencia de las nubes.

Dado que la única variable necesaria en la producción animal no es la biomasa ofrecida, se sugiere avanzar en el monitoreo de oferta de nutrientes.

Debido a que los cambios de cobertura pueden ser muy veloces, se sugiere diseñar un método específico para praderas de vigilancia de cambios de cobertura, que sirva para la medición de BAP a escala municipal, y poder hacer seguimientos multitemporales de la evolución de las praderas a lo largo de varios años sin tener límites de orden de meses.

Se recomienda generar ecuaciones de BAP para diferentes tipos de praderas; para los pastos enrastrados es pertinente no solo las diferencias en biomasa, sino también las diferencias nutricionales.

BILBIOGRAFÍA

- Archer.E. (2004) Beyond the “climate versus grazing” impasse: using remote sensing to investigate the effects of grazing system choice on vegetation cover in the eastern Karoo. En *Journal of Arid Environments* (57). 381–408
- Baret,F, A; M. Weiss,M,A; Lacaze, R,B; Camacho, F,C; Makhmara ,H,D; Pacholczyk,P,D; Smets D B,E. (2013) GEOV1: LAI and FAPAR essential climate variables and FCOVER global time series capitalizing over existing products. Part1: Principles of development and production. En *Remote Sensing of Environment*. 137. 299-309.
- Boschetti. M, Bocchi. S, Brivio. P.A. (2007) Assessment of pasture production in the Italian alps using spectrometric and remote sensing information. En *Agriculture, Ecosystems and Environment* (118). 267–272.
- Bruinsma,J. (2002)World agriculture: towards 2015/2030 and FAO perspective. UK and USA.
- Cajas,Y,S; Barragán, W, A; Arreaza, L, C; Argüelles, J; Amézquita, E; Abuabara,Y; Panza, B; Lascano C. (2012) Efecto sobre la producción de carne de la aplicación de tecnologías de renovación de praderas de *Bothriochloa pertusa* (L.) A. Camus en la Costa Norte Colombiana. En *Revista Corpoica - Ciencia y Tecnología Agropecuaria* 13(2), 213-218
- Campbell,J,B. *Introduction to Remote Sensing* (1996). New york USA.
- Cárdenas, N,E. (2013). Efectos de algunos parámetros productivos, técnicos y administrativos sobre la calidad de la leche en hatos lecheros de Antioquia. Proyecto de tesis no publicado. Universidad Nacional de Colombia, Medellín Colombia.
- Chenghai Yanga; Everitt J, H; Murdenb, D. (2011) Evaluating high resolution SPOT 5 satellite imagery for crop identification. *Computers and Electronics in Agriculture* 75 347–354.
- Chuvieco,E. *Fundamentos de teledeteccion esapacial*. (2000). Madrid España.
- Cuesta,P,A. (2005) Fundamentos de manejo de praderas para mejorar la productividad de la ganadería del trópico colombiano. En *Revista Corpoica*.6 (2) 5-13.
- Devendra Singh. (2011) Generation and evaluation of gross primary productivity using Landsat data through blending with MODIS data. En *International Journal of Applied Earth Observation and Geoinformation* 13 59–69
- Dorigo, W,A; Zurita-Milla, R;c,1, De Wit, A,J,W; Brazile, J; Singh, R; Schaepman, M,E. (2007) A review on reflective remote sensing and data assimilation techniques for enhanced agroecosystem modeling. En *International Journal of Applied Earth Observation and Geoinformation* 9 165–193
- Edirisinghea,A; Clarkb, D; Waughb, D. (2012) Spatio-temporal modelling of biomass of intensively grazed perennial dairy pastures using multispectral remote sensing. En *International Journal of Applied Earth Observation and Geoinformation* 16 5–16

- ESRI. (2013) ArcGIS desktop 9.3 help.
http://webhelp.esri.com/ARCGISDESKTOP/9.3/index.cfm?TopicName=Area_Solar_Radiation
- FEDEGAN.(2006) Plan estratégico de la ganadería colombiana 2019. 2006. Bogotá DC. Colombia.
- Ferwerda.J.G. (2005)Nitrogen detection across plant species. En charting the quality of forage. Netherlands.
- Giraldo,L,A; Zapata,M; Laguado,W,G; Monoya,E,S. (2009) Potencial del silvopastoreo para la intencificacion productiva y la sostenibilidad ambiental de la ganadería en Antioquia.Trabajo nominado y finalista al premio de la ganadería Jose Raimundo Sojo Zambrano.,p29.
- Gobernación de Antioquia (?), Perfil Subregional norte de Antioquia. Medellín Colombia.
- Grigera, G; Oesterheld, M; Pacin, F. (2007) Monitoring forage production for farmers' decision makin. In Agricultural systems. 94. 637-648
- Haydock, K. P.; Shaw, N. H. 1975.The comparative yield method for estimating dry matter yield of pasture. Australian Journal of Experimental Agriculture Animal Husbandry. 15: 169-171.
- Herrero,M; Fawcett,R,H; Silveira,V; Busqué, J; Bernués, A; Dent, J,B.(2000). Modelling the growth and utilisation of kikuyu grass (*Pennisetum clandestinum*) under grazing. 1. Model de@nition and parameterisation En Agricultural Systems 65 73-97
- Hill,M; Donal,G; Hyder,M; Smith R. (2004).Estimation of pasture growth rate in the south west of Western Australia from AVHRR NDVI and climate data. En RemoteSensing of Environment (93). P 528-545.
- Hirata, M., N. Koga, H. Shinjo, H. Fujita, G. Gintzburger, J. Ishida, y A. Miyazaki. (2005) Measurement of above-ground plant biomass, forage availability and grazing impact by combining satellite image processing and field survey in a dry area of north-eastern Syria. En Grass and Forage Science 60. 25-33.
- Huete, A; Didan,K; Miura,T; Rodriguez, E,P; gao,X; Ferreira, L,G. (2002) Overview of the radiometric and biophysical performance of the MODIS vegetation indices. En Remote Sensing of Environment 83, 195-213.
- IDEAM (2010) Zonificación de los conflictos de uso de las tierras en Colombia: leyenda Nacional de Coberturas de la Tierra. Metodología CORINE Land Cover adaptada para Colombia Escala 1:100.000. Bogotá D C.
- Institute for Statistics and Mathematics (2013). The R Project for Statistical Computing <http://www.r-project.org/>
- Irons, J, R; Taylor, M, P; Rocchio, L; (2013) About. Landsat Then and Now. http://landsat.gsfc.nasa.gov/?page_id=2
- ITT CORPORATION.(2006). Environment for visualizing images – ENVI. ENVI Tutorial
- Jae-Seok Lee (2011) Combined effect of elevated CO2 and temperature on the growth and phenology of two annual C3 and C4 weedy species. En Agriculture, Ecosystems and Environment 140 484–491

- Kurtz.D.B, Schellberg.J.R, Braun.M. (2010) Ground and satellite based assessment of rangeland management in sub-tropical Argentina. En *Applied Geography* (30). 210–220.
- Lucas,R; Rowlands,A; Brown,A; Keyworth,S; Bunting,P. (2007) Rule-based classification of multi-temporal satellite imagery for habitat and agricultural land cover mapping in *Journal of Photogrammetry & Remote Sensing* (62) 165–185
- Maccherone, B; Frazier,S. (2013)About Modis. <http://modis.gsfc.nasa.gov/about/>
- Mahmoud El Hajj.Agnès Bégué B. Guillaume, S C. Martiné, J,F. (2009) Integrating SPOT-5 time series, crop growth modeling and expert knowledge for monitoring agricultural practices The case of sugarcane harvest on Reunion Island. En *Remote Sensing of Environment* 113 2052–2061.
- McCree, K,j. Test of current definitions of photosynthetically active radiation against leaf photosynthesis. En *Agricultural Meteorology* 10, 1972, 442–453.
- Mendoza, C, A. (2011) Efecto de la variación diaria en la oferta forrajera sobre el volumen y composición de la leche en explotaciones de la Sabana de Bogotá. Tesis de Maestría. Universidad Nacional de Colombia Facultad de Medicina Veterinaria y de Zootecnia Departamento de producción animal Bogotá, D.C.
- Metz,B; Davidson, O.R; Bosch, P.R; Dave, R; Meyer L.A. (2007) Mitigation. Contribution of Working Group III to the Fourth Assessment Report of the IPCC. En *Climate Change 2007: Mitigation of Climate Change.UK and USA.*
- Mkhabela. M.S, Bullock. P, Raj S, Wang.S, Yang. Y. (2010) Crop yield forecasting on the Canadian Prairies using MODIS NDVI data. In *Agricultural and Forest Meteorology* (151). 385-393.
- Monteiht,J,L. (1972) Solar Radiation and productivity in tropical ecosystems. En *The journal of applied ecology.* 9. 747-766.
- Neely, C.; Bunning, S.; Wilkes, A. (2009). Review of evidence on drylands pastoral systems and climate change Implications and opportunities for mitigation and adaptation. En *Book Review of evidence on drylands pastoral systems and climate change: implications and opportunities for mitigation and adaptation.* 50 pp. Rome. Italia.
- Numata. I, Roberts.D.A, Chadwick. O.A, Schimel,j, Sampaio. F.R, Leonidas. F.C, Soares. J.V. (2007) Characterization of pasture biophysical properties and the impact of grazing intensity using remotely sensed data. En *Remote Sensing of Environment* (109). 314–327.
- Palacio, O. (2001) Acuerdo regional de Competitividad de la cadena Láctea de Antioquia. Meek, E (Ed).Medellin.
- Phillips, R; Beer, O; Scholljegerdes, E; Bjergaard, D; Hendrickson, J. (2009) Integration of geospatial and cattle nutrition information to estimate paddock grazing capacity in Northern US prairie. En *Agricultural Systems* (100). 72–79.
- Prince,S,D; Goetz,S,J; Goward,S,N. (1995). Monitoring primary production from earth observing satellites. En *Water, Air and Soil pollution* 82, 509-522.
- Sakamoto,A,E; Wardlow A; Anatoly A; Gitelson, B, Shashi, B; Verma, C. Andrew, E.. Suyker, C. Timothy J. Arkebauer, D. (2010) A Two-Step Filtering approach for detecting maize and soybean phenology with time-series MODIS data.in *Remote Sensing of Environment* 114 2146–2159.

- Schowengerdt,R. (1997) Remote sensing: models and methods for image processing. En academic press. Tucson, arizona: 522
- Secretaria de agricultura y desarrollo rural, gobernación de Antioquia. Anuario estadístico del sector agropecuario en el departamento de Antioquia 2011.(2012). Medellín.
- Smith,M,J. Goodchild,M,F. Longley,P,A. (2013)Geospatial Analysis: a comprehensive guide to principles techniques and software tools . 4 edition. London
- Solano,R. Didan,K. Jacobson. (2010) MODIS Vegetation Index User's Guide (MOD13 Series) Version 2.00. In (Collection 5). The University of Arizona
- URPA, Gobernación de Antioquia, Secretaria de agricultura de Antioquia y desarrollo rural. (2011). Zonificación agropecuaria, piscícola y forestal departamento de Antioquia. Medellín Colombia.
- YU Long; ZHOU Li; LIU Wei; ZHOU Hua-Kun. (2010) Using Remote Sensing and GIS Technologies to Estimate Grass Yield and Livestock Carrying Capacity of Alpine Grasslands in Golog Prefecture, China. En Pedosphere 20 (3). 342-351.

ANEXOS

Tabla 12 Anexo1: Biomasa MS medida para predios del numeral 4.2

| Hato | Tamaño Franja (m ²) | Periodo de Descanso | Municipio | Fecha de Visita oferta | Oferta M. Seca (kg/m ²) | Fecha de Visita Rechazo | Rechazo M. Seca (kg/m ²) |
|-------------------|---------------------------------|---------------------|-----------|------------------------|-------------------------------------|-------------------------|--------------------------------------|
| aguas claras alta | 1034.56 | 49 | San Pedro | 10/05/2011 | 0.796 | 13/05/2011 | 0.536 |
| aguas claras alta | 627.92 | 42 | San Pedro | 10/06/2011 | 0.527 | 13/06/2011 | 0.404 |
| aguas claras alta | 934.32 | 37 | San Pedro | 12/07/2011 | 0.841 | 15/07/2011 | 0.756 |
| aguas claras alta | 793.28 | 36 | San Pedro | 08/08/2011 | 1.038 | 11/08/2011 | 0.654 |
| aguas claras alta | 594.24 | 39 | San Pedro | 17/09/2011 | 1.062 | 20/09/2011 | 0.897 |
| aguas claras alta | 770.00 | 47 | San Pedro | 12/10/2011 | 0.630 | 15/10/2011 | 0.518 |
| aguas claras alta | 639.28 | 37 | San Pedro | 15/11/2011 | 0.869 | 18/11/2011 | 0.676 |
| aguas claras alta | 365.20 | 39 | San Pedro | 20/11/2011 | 1.144 | 23/11/2011 | 0.422 |
| aguas claras baja | 1001.68 | 45 | San Pedro | 10/05/2011 | 0.844 | 13/05/2011 | 0.580 |
| aguas claras baja | 483.04 | 42 | San Pedro | 10/06/2011 | 0.717 | 13/06/2011 | 0.556 |
| aguas claras baja | 1092.64 | 37 | San Pedro | 12/07/2011 | 0.995 | 15/07/2011 | 0.790 |
| aguas claras baja | 916.16 | 39 | San Pedro | 08/08/2011 | 0.789 | 11/08/2011 | 0.666 |
| aguas claras baja | 451.28 | 45 | San Pedro | 17/09/2011 | 1.123 | 20/09/2011 | 0.831 |
| aguas claras baja | 469.44 | 43 | San Pedro | 12/10/2011 | 1.079 | 15/10/2011 | 0.599 |
| aguas claras baja | 586.80 | 39 | San Pedro | 15/11/2011 | 1.104 | 18/11/2011 | 0.874 |
| aguas claras baja | 318.56 | 36 | San Pedro | 20/11/2011 | 1.010 | 23/11/2011 | 0.421 |
| altamira | 660.00 | 60 | San Pedro | 21/05/2011 | 0.965 | 24/05/2011 | 0.621 |
| altamira | 1029.60 | 60 | San Pedro | 20/06/2011 | 0.598 | 23/06/2011 | 0.507 |
| altamira | 623.04 | 60 | San Pedro | 16/07/2011 | 1.371 | 19/07/2011 | 0.755 |
| altamira | 809.04 | 60 | San Pedro | 19/08/2011 | 0.753 | 22/08/2011 | 0.604 |

| | | | | | | | |
|-----------------|---------|----|-----------|------------|-------|------------|-------|
| altamira | 585.76 | 57 | San Pedro | 27/09/2011 | 0.767 | 30/09/2011 | 0.331 |
| altamira | 652.56 | 55 | San Pedro | 22/10/2011 | 0.565 | 25/10/2011 | 0.326 |
| altamira | 620.08 | 52 | San Pedro | 19/11/2011 | 0.667 | 22/11/2011 | 0.478 |
| altamira | 1070.16 | 60 | San Pedro | 17/12/2011 | 0.962 | 20/12/2011 | 0.390 |
| buena vista | 316.80 | 55 | San Pedro | 28/05/2011 | 1.016 | 31/05/2011 | 0.498 |
| buena vista | 619.60 | 55 | San Pedro | 25/06/2011 | 0.985 | 28/06/2011 | 0.666 |
| buena vista | 758.32 | 55 | San Pedro | 29/07/2011 | 0.777 | 01/08/2011 | 0.460 |
| buena vista | 691.12 | 55 | San Pedro | 28/08/2011 | 1.076 | 31/08/2011 | 0.609 |
| buena vista | 951.12 | 55 | San Pedro | 26/09/2011 | 0.785 | 29/09/2011 | 0.700 |
| buena vista | 1239.28 | 55 | San Pedro | 30/10/2011 | 0.863 | 02/11/2011 | 0.608 |
| buena vista | 3732.00 | 55 | San Pedro | 18/11/2011 | 0.454 | 21/11/2011 | 0.413 |
| buena vista | 1437.36 | 55 | San Pedro | 10/12/2011 | 0.911 | 13/12/2011 | 0.819 |
| el comun | 1265.84 | 46 | Belmira | 24/05/2011 | 1.084 | 27/05/2011 | 0.919 |
| el comun | 930.40 | 42 | Belmira | 21/06/2011 | 1.143 | 24/06/2011 | 0.896 |
| el comun | 961.04 | 43 | Belmira | 23/07/2011 | 0.819 | 26/07/2011 | 0.666 |
| el comun | 1124.80 | 42 | Belmira | 22/08/2011 | 1.056 | 25/08/2011 | 0.953 |
| el comun | 1960.00 | 45 | Belmira | 22/09/2011 | 0.971 | 25/09/2011 | 0.809 |
| el comun | 786.64 | 46 | Belmira | 23/10/2011 | 0.970 | 26/10/2011 | 0.594 |
| el comun | 1103.12 | 42 | Belmira | 19/11/2011 | 0.723 | 22/11/2011 | 0.664 |
| el comun | 1348.32 | 42 | Belmira | 14/12/2011 | 0.994 | 17/12/2011 | 0.770 |
| la almeria alta | 1103.92 | 43 | San Pedro | 13/05/2011 | 0.819 | 16/05/2011 | 0.673 |
| la almeria alta | 1279.92 | 45 | San Pedro | 13/06/2011 | 0.629 | 16/06/2011 | 0.310 |
| la almeria alta | 968.32 | 47 | San Pedro | 19/07/2011 | 0.969 | 22/07/2011 | 0.526 |
| la almeria alta | 601.12 | 44 | San Pedro | 22/08/2011 | 1.163 | 25/08/2011 | 0.810 |
| la almeria alta | 430.08 | 43 | San Pedro | 23/09/2011 | 1.014 | 26/09/2011 | 0.687 |
| la almeria alta | 158.16 | 47 | San Pedro | 23/10/2011 | 1.474 | 26/10/2011 | 1.005 |
| la almeria alta | 538.32 | 46 | San Pedro | 19/11/2011 | 1.205 | 22/11/2011 | 1.024 |
| la almeria baja | 875.68 | 46 | San Pedro | 13/05/2011 | 0.909 | 16/05/2011 | 0.590 |
| la almeria baja | 822.88 | 50 | San Pedro | 13/06/2011 | 0.574 | 16/06/2011 | 0.384 |

| | | | | | | | |
|---------------------------------|---------|----|-----------|------------|-------|------------|-------|
| la almeria baja | 1523.04 | 49 | San Pedro | 19/07/2011 | 0.935 | 22/07/2011 | 0.667 |
| la almeria baja | 993.36 | 45 | San Pedro | 22/08/2011 | 0.883 | 25/08/2011 | 0.816 |
| la almeria baja | 426.08 | 48 | San Pedro | 23/09/2011 | 1.424 | 26/09/2011 | 0.788 |
| la almeria baja | 426.08 | 54 | San Pedro | 23/10/2011 | 0.937 | 26/10/2011 | 0.795 |
| la almeria baja | 377.68 | 58 | San Pedro | 19/11/2011 | 1.279 | 22/11/2011 | 0.721 |
| la carlota | 1877.60 | 47 | El Retiro | 04/05/2011 | 0.819 | 07/05/2011 | 0.440 |
| la carlota | 2612.16 | 47 | El Retiro | 11/06/2011 | 0.566 | 14/06/2011 | 0.442 |
| la carlota | 4128.56 | 46 | El Retiro | 11/07/2011 | 0.613 | 14/07/2011 | 0.466 |
| la carlota | 938.16 | 46 | El Retiro | 07/08/2011 | 0.816 | 10/08/2011 | 0.559 |
| la carlota | 1018.32 | 46 | El Retiro | 11/09/2011 | 0.944 | 14/09/2011 | 0.690 |
| la carlota | 1790.88 | 47 | El Retiro | 09/10/2011 | 0.741 | 12/10/2011 | 0.493 |
| la carlota | 986.40 | 47 | El Retiro | 08/11/2011 | 0.549 | 11/11/2011 | 0.353 |
| la carlota | 1895.84 | 46 | El Retiro | 01/12/2011 | 0.547 | 04/12/2011 | 0.411 |
| la carmen | 2004.56 | 45 | La Union | 09/05/2011 | 0.844 | 12/05/2011 | 0.577 |
| la carmen | 2576.88 | 45 | La Union | 10/06/2011 | 0.674 | 13/06/2011 | 0.620 |
| la carmen | 3439.04 | 45 | La Union | 10/07/2011 | 0.725 | 13/07/2011 | 0.483 |
| la carmen | 3277.36 | 45 | La Union | 24/08/2011 | 1.321 | 27/08/2011 | 0.895 |
| la carmen | 2987.04 | 45 | La Union | 26/09/2011 | 1.131 | 29/09/2011 | 0.866 |
| la carmen | 1852.32 | 45 | La Union | 24/10/2011 | 0.901 | 27/10/2011 | 0.799 |
| la carmen | 2334.48 | 45 | La Union | 23/12/2011 | 0.920 | 26/12/2011 | 0.544 |
| la posada de los llanos baja | 796.80 | 40 | San Pedro | 20/05/2011 | 0.871 | 23/05/2011 | 0.620 |
| la posada de los llanos baja | 1946.88 | 40 | San Pedro | 20/06/2011 | 0.721 | 23/06/2011 | 0.587 |
| la posada de los llanos baja | 833.68 | 40 | San Pedro | 14/08/2011 | 0.820 | 17/08/2011 | 0.662 |
| la posada de los llanos baja | 2256.32 | 40 | San Pedro | 13/09/2011 | 0.995 | 16/09/2011 | 0.924 |
| la posada de los llanos baja | 332.88 | 40 | San Pedro | 10/10/2011 | 0.685 | 13/10/2011 | 0.281 |

| | | | | | | | |
|------------------------------|---------|----|-----------------------|------------|-------|------------|-------|
| la posada de los llanos baja | 673.76 | 40 | San Pedro | 01/11/2011 | 0.843 | 04/11/2011 | 0.744 |
| la posada de los llanos alta | 2200.00 | 50 | San Pedro | 20/05/2011 | 1.062 | 23/05/2011 | 0.875 |
| la posada de los llanos alta | 2200.00 | 50 | San Pedro | 20/06/2011 | 0.949 | 23/06/2011 | 0.770 |
| la posada de los llanos alta | 2200.00 | 50 | San Pedro | 14/08/2011 | 0.938 | 17/08/2011 | 0.704 |
| la posada de los llanos alta | 2200.00 | 50 | San Pedro | 13/09/2011 | 1.329 | 16/09/2011 | 1.095 |
| la posada de los llanos alta | 2200.00 | 50 | San Pedro | 10/10/2011 | 0.928 | 13/10/2011 | 0.698 |
| la posada de los llanos alta | 2200.00 | 50 | San Pedro | 01/11/2011 | 0.924 | 04/11/2011 | 0.640 |
| paysandu | 1384.40 | 45 | Medellin(Santa Elena) | 22/05/2011 | 0.812 | 25/05/2011 | 0.610 |
| paysandu | 1938.32 | 44 | Medellin(Santa Elena) | 19/06/2011 | 0.989 | 22/06/2011 | 0.759 |
| paysandu | 2233.28 | 42 | Medellin(Santa Elena) | 19/07/2011 | 0.761 | 22/07/2011 | 0.661 |
| paysandu | 1732.80 | 43 | Medellin(Santa Elena) | 11/09/2011 | 1.235 | 14/09/2011 | 0.942 |
| paysandu | 1205.60 | 43 | Medellin(Santa Elena) | 13/10/2011 | 1.038 | 16/10/2011 | 0.763 |
| paysandu | 1184.16 | 45 | Medellin(Santa Elena) | 15/11/2011 | 0.954 | 18/11/2011 | 0.750 |
| paysandu | 995.28 | 41 | Medellin(Santa Elena) | 04/12/2011 | 0.894 | 07/12/2011 | 0.465 |
| pinar verde | 724.64 | 35 | Belmira | 27/05/2011 | 1.257 | 30/05/2011 | 0.700 |
| pinar verde | 1521.60 | 35 | Belmira | 26/06/2011 | 0.850 | 29/06/2011 | 0.715 |
| pinar verde | 2233.28 | 35 | Belmira | 24/07/2011 | 1.073 | 27/07/2011 | 0.870 |
| pinar verde | 703.04 | 35 | Belmira | 22/08/2011 | 1.122 | 25/08/2011 | 1.008 |
| pinar verde | 682.24 | 35 | Belmira | 23/09/2011 | 1.392 | 26/09/2011 | 0.855 |
| pinar verde | 806.08 | 35 | Belmira | 23/10/2011 | 1.009 | 26/10/2011 | 0.683 |

| | | | | | | | |
|-------------|---------|----|-----------|------------|-------|------------|-------|
| pinar verde | 1707.52 | 35 | Belmira | 18/11/2011 | 0.777 | 21/11/2011 | 0.657 |
| pinar verde | 499.52 | 35 | Belmira | 04/12/2011 | 1.006 | 07/12/2011 | 0.828 |
| san gabriel | 695.84 | 56 | San Pedro | 20/05/2011 | 0.828 | 23/05/2011 | 0.560 |
| san gabriel | 1070.56 | 58 | San Pedro | 19/06/2011 | 0.657 | 22/06/2011 | 0.477 |
| san gabriel | 2451.76 | 52 | San Pedro | 18/07/2011 | 0.823 | 21/07/2011 | 0.718 |
| san gabriel | 731.04 | 54 | San Pedro | 14/08/2011 | 1.246 | 17/08/2011 | 0.951 |
| san gabriel | 1156.80 | 60 | San Pedro | 10/10/2011 | 0.585 | 13/10/2011 | 0.397 |

Tabla 13 Anexo2 Datos usados en el numeral 4.5 de BAP promedio, NDVI, SR y APAR tanto Modis como Landsat por predio

| Hato | Fecha | Materia seca promedio | MODIS | | | Landsat | | | |
|---------------------------------|----------------|-----------------------------|-------|------|----------|---------|------|----------|-------|
| | | | NDVI | SR | APAR | NDVI | SR | APAR | row |
| la posada de los llanos baja | 25/05/201 1 | 0.75 | 0.83 | 0.95 | 5,487.12 | | | | |
| la posada de los llanos baja | 12/07/201 1 | | 0.83 | 0.94 | 4,880.80 | | | | |
| la posada de los llanos baja | 19/07/201 1 | | | | | 0.81 | 0.77 | 4,289.68 | 56.00 |
| la posada de los llanos baja | 28/07/201 1 | | 0.82 | 0.94 | 4,874.32 | | | | |
| la posada de los llanos baja | 13/08/201 1 | 0.74 | 0.80 | 0.88 | 4,620.56 | | | | |
| la posada de los llanos baja | 29/08/201 1 | 0.83 | 0.70 | 0.56 | 5,653.53 | | | | |
| la posada de los llanos baja | 05/09/201 1 | 0.83 | | | | 0.86 | 0.88 | 5,086.63 | 56.00 |
| la posada de los llanos (1) | 09/05/201 1 | | 0.69 | 0.59 | 3,488.31 | | | | |

| | | | | | | | | | |
|--------------------------------|----------------|------|------|------|----------|------|------|----------|-------|
| la posada de los llanos (1) | 25/05/201 1 | 0.97 | 0.80 | 0.91 | 5,484.33 | | | | |
| la posada de los llanos (1) | 12/07/201 1 | | 0.80 | 0.90 | 5,268.93 | | | | |
| la posada de los llanos (1) | 28/07/201 1 | | 0.87 | 0.95 | 5,592.70 | | | | |
| la posada de los llanos (1) | 13/08/201 1 | 0.82 | 0.81 | 0.93 | 5,475.48 | | | | |
| la posada de los llanos (1) | 29/08/201 1 | 1.02 | 0.81 | 0.93 | 5,515.70 | | | | |
| la posada de los llanos (1) | 03/12/201 1 | | 0.65 | 0.48 | 2,768.54 | | | | |
| pinar verde | 09/05/201 1 | | 0.80 | 0.90 | 5,233.24 | | | | |
| pinar verde | 25/05/201 1 | 0.98 | 0.79 | 0.84 | 4,959.45 | | | | |
| pinar verde | 10/06/201 1 | 0.78 | 0.79 | 0.95 | 4,954.98 | | | | |
| pinar verde | 26/06/201 1 | 0.78 | 0.82 | 0.95 | 5,222.26 | | | | |
| pinar verde | 03/07/201 1 | 0.78 | | | | 0.62 | 0.47 | 2,780.99 | 56.00 |
| pinar verde | 12/07/201 1 | 0.89 | 0.79 | 0.85 | 4,803.39 | | | | |
| pinar verde | 19/07/201 1 | 0.97 | | | | 0.81 | 0.85 | 5,597.33 | 55.00 |
| pinar verde | 19/07/201 1 | 0.97 | | | | 0.83 | 0.88 | 5,201.16 | 56.00 |
| pinar verde | 28/07/201 1 | 0.97 | 0.77 | 0.79 | 4,386.05 | | | | |
| pinar verde | 13/08/201 1 | 1.06 | 0.76 | 0.75 | 4,163.05 | | | | |
| pinar verde | 29/08/201 1 | 1.06 | 0.76 | 0.74 | 4,201.69 | | | | |

| | | | | | | | | | | |
|-------------|-----------|---|------|------|------|----------|------|------|----------|-------|
| pinar verde | 05/09/201 | 1 | 1.06 | | | | 0.82 | 0.85 | 5,608.02 | 55.00 |
| pinar verde | 05/09/201 | 1 | 1.06 | | | | 0.94 | 0.93 | 5,625.21 | 56.00 |
| pinar verde | 30/09/201 | 1 | 1.12 | 0.78 | 0.79 | 4,590.78 | | | | |
| pinar verde | 01/11/201 | 1 | 0.85 | 0.81 | 0.93 | 5,431.20 | | | | |
| pinar verde | 19/12/201 | 1 | | 0.81 | 0.92 | 5,654.14 | | | | |
| paysandu | 25/05/201 | 1 | 0.71 | 0.66 | 0.50 | 2,733.23 | | | | |
| paysandu | 10/06/201 | 1 | 0.80 | 0.73 | 0.66 | 4,198.29 | | | | |
| paysandu | 26/06/201 | 1 | 0.87 | 0.83 | 0.95 | 6,530.00 | | | | |
| paysandu | 28/07/201 | 1 | 0.71 | 0.76 | 0.72 | 5,396.98 | | | | |
| paysandu | 13/08/201 | 1 | | 0.81 | 0.94 | 6,767.87 | | | | |
| paysandu | 29/08/201 | 1 | | 0.74 | 0.67 | 4,389.87 | | | | |
| paysandu | 05/09/201 | 1 | 1.09 | | | | 0.90 | 0.86 | 5,389.78 | 56.00 |
| paysandu | 01/11/201 | 1 | 0.86 | 0.49 | 0.29 | 925.84 | | | | |
| paysandu | 19/12/201 | 1 | | 0.72 | 0.66 | 1,441.22 | | | | |
| la carlota | 09/05/201 | 1 | 0.63 | 0.55 | 0.35 | 2,268.26 | | | | |
| la carlota | 25/05/201 | 1 | | 0.67 | 0.50 | 3,481.24 | | | | |
| la carlota | 10/06/201 | 1 | 0.50 | 0.74 | 0.68 | 4,784.57 | | | | |

| | | | | | | | | | | |
|-----------------|-----------|---|------|------|------|----------|------|------|----------|-------|
| la carlota | 26/06/201 | 1 | 0.53 | 0.78 | 0.83 | 5,872.28 | | | | |
| la carlota | 12/07/201 | 1 | 0.54 | 0.78 | 0.81 | 5,900.56 | | | | |
| la carlota | 28/07/201 | 1 | 0.64 | 0.70 | 0.58 | 4,244.28 | | | | |
| la carlota | 13/08/201 | 1 | 0.69 | 0.76 | 0.73 | 5,297.05 | | | | |
| la carlota | 29/08/201 | 1 | 0.75 | 0.73 | 0.67 | 4,738.79 | | | | |
| la carlota | 30/09/201 | 1 | 0.72 | 0.66 | 0.50 | 3,303.24 | | | | |
| la carlota | 01/11/201 | 1 | 0.45 | 0.61 | 0.42 | 2,398.29 | | | | |
| la carlota | 17/11/201 | 1 | 0.45 | 0.79 | 0.84 | 4,497.33 | | | | |
| la carlota | 03/12/201 | 1 | 0.48 | 0.41 | 0.24 | 1,236.85 | | | | |
| la carlota | 19/12/201 | 1 | | 0.73 | 0.71 | 4,762.95 | | | | |
| la almeria baja | 09/05/201 | 1 | 0.75 | 0.67 | 0.56 | 2,185.58 | | | | |
| la almeria baja | 25/05/201 | 1 | 0.58 | 0.75 | 0.69 | 2,348.16 | | | | |
| la almeria baja | 10/06/201 | 1 | 0.48 | 0.79 | 0.86 | 2,576.59 | | | | |
| la almeria baja | 26/06/201 | 1 | 0.66 | 0.67 | 0.54 | 1,486.65 | | | | |
| la almeria baja | 28/07/201 | 1 | 0.80 | 0.79 | 0.88 | 2,272.14 | | | | |
| la almeria baja | 04/08/201 | 1 | 0.78 | | | | 0.82 | 0.83 | 1,992.01 | 55.00 |
| la almeria baja | 13/08/201 | 1 | 0.78 | 0.90 | 0.95 | 2,586.51 | | | | |

| | | | | | | | | | |
|-----------------|----------------|------|------|------|----------|------|------|----------|-------|
| la almeria baja | 29/08/201 1 | 0.85 | 0.79 | 0.87 | 2,567.96 | | | | |
| la almeria baja | 05/09/201 1 | 0.85 | | | | 0.78 | 0.81 | 2,211.80 | 55.00 |
| la almeria baja | 05/09/201 1 | 0.85 | | | | 0.90 | 0.93 | 2,828.74 | 56.00 |
| la almeria baja | 01/11/201 1 | 1.04 | 0.79 | 0.83 | 4,359.49 | | | | |
| la almeria baja | 19/11/201 1 | | | | | | | | |
| la almeria baja | 22/11/201 1 | | | | | | | | |
| la almeria baja | 03/12/201 1 | | 0.65 | 0.48 | 3,302.66 | | | | |
| la almeria baja | 19/12/201 1 | | 0.85 | 0.95 | 7,099.98 | | | | |
| la almeria alta | 25/05/201 1 | 0.65 | 0.68 | 0.53 | 2,541.76 | | | | |
| la almeria alta | 10/06/201 1 | 0.47 | 0.76 | 0.76 | 3,613.03 | | | | |
| la almeria alta | 26/06/201 1 | 0.64 | 0.62 | 0.49 | 2,341.92 | | | | |
| la almeria alta | 28/07/201 1 | 0.75 | 0.76 | 0.75 | 3,524.98 | | | | |
| la almeria alta | 13/08/201 1 | 0.84 | 0.81 | 0.82 | 3,860.29 | | | | |
| la almeria alta | 29/08/201 1 | 0.99 | 0.74 | 0.70 | 3,222.76 | | | | |
| la almeria alta | 05/09/201 1 | 0.91 | | | | 0.80 | 0.83 | 2,929.39 | 55.00 |
| la almeria alta | 05/09/201 1 | 0.91 | | | | 0.90 | 0.92 | 4,576.48 | 56.00 |
| la almeria alta | 01/11/201 1 | 1.11 | 0.76 | 0.75 | 3,814.32 | | | | |

| | | | | | | | | | |
|-----------------|----------------|------|------|------|----------|------|------|----------|-------|
| la almeria alta | 03/12/201 1 | | 0.61 | 0.44 | 2,498.08 | | | | |
| la almeria alta | 19/12/201 1 | | 0.84 | 0.94 | 5,460.39 | | | | |
| san gabriel | 09/05/201 1 | | 0.72 | 0.62 | 4,156.74 | | | | |
| san gabriel | 25/05/201 1 | 0.69 | 0.79 | 0.88 | 5,200.92 | | | | |
| san gabriel | 12/07/201 1 | 0.77 | 0.79 | 0.86 | 4,866.92 | | | | |
| san gabriel | 28/07/201 1 | 0.98 | 0.85 | 0.93 | 5,235.99 | | | | |
| san gabriel | 13/08/201 1 | 1.10 | 0.79 | 0.86 | 4,887.53 | | | | |
| san gabriel | 29/08/201 1 | | 0.79 | 0.87 | 5,023.85 | | | | |
| san gabriel | 05/09/201 1 | | | | | 0.94 | 0.95 | 5,023.24 | 56.00 |
| san gabriel | 03/12/201 1 | | 0.66 | 0.49 | 3,019.81 | | | | |
| el comun | 09/05/201 1 | | 0.83 | 0.95 | 3,706.42 | | | | |
| el comun | 25/05/201 1 | 1.00 | 0.79 | 0.84 | 2,880.16 | | | | |
| el comun | 26/06/201 1 | 1.02 | 0.82 | 0.93 | 2,583.16 | | | | |
| el comun | 12/07/201 1 | 0.86 | 0.66 | 0.54 | 1,493.55 | | | | |
| el comun | 19/07/201 1 | 0.74 | | | | 0.86 | 0.93 | 2,303.71 | 55.00 |
| | | 0.74 | | | | 0.88 | 0.94 | 2,536.27 | 56.00 |
| el comun | 28/07/201 1 | 0.74 | 0.85 | 0.95 | 2,565.86 | | | | |

| | | | | | | | | | | |
|-------------|-----------|---|------|------|------|----------|------|------|----------|-------|
| el comun | 13/08/201 | 1 | 1.00 | 0.81 | 0.95 | 2,657.37 | | | | |
| el comun | 29/08/201 | 1 | 1.00 | 0.77 | 0.78 | 2,332.19 | | | | |
| el comun | 30/09/201 | 1 | 0.89 | 0.65 | 0.48 | 1,828.56 | | | | |
| el comun | 01/11/201 | 1 | 0.66 | 0.82 | 0.94 | 4,929.90 | | | | |
| el comun | 19/12/201 | 1 | 0.88 | 0.83 | 0.95 | 7,101.57 | | | | |
| buena vista | 09/05/201 | 1 | | 0.76 | 0.74 | 2,535.34 | | | | |
| buena vista | 25/05/201 | 1 | 0.76 | 0.80 | 0.86 | 2,937.56 | | | | |
| buena vista | 10/06/201 | 1 | 0.74 | 0.46 | 0.31 | 1,003.38 | | | | |
| buena vista | 26/06/201 | 1 | 0.83 | 0.69 | 0.57 | 1,654.02 | | | | |
| buena vista | 12/07/201 | 1 | 0.83 | 0.80 | 0.86 | 2,545.37 | | | | |
| buena vista | 19/07/201 | 1 | 0.77 | | | | 0.67 | 0.57 | 1,118.89 | 56.00 |
| buena vista | 28/07/201 | 1 | 0.62 | 0.75 | 0.70 | 2,093.73 | | | | |
| buena vista | 13/08/201 | 1 | 0.77 | 0.81 | 0.95 | 2,919.12 | | | | |
| buena vista | 29/08/201 | 1 | 0.84 | 0.78 | 0.80 | 2,466.47 | | | | |
| buena vista | 05/09/201 | 1 | 0.84 | | | | 0.87 | 0.82 | 2,276.98 | 56.00 |
| buena vista | 03/12/201 | 1 | 0.66 | 0.42 | 0.29 | 1,175.28 | | | | |
| altamira | 25/05/201 | 1 | 0.79 | 0.79 | 0.84 | 4,601.01 | | | | |

| | | | | | | | | | | |
|--------------|-----------|---|------|------|------|----------|------|------|----------|-------|
| altamira | 10/06/201 | 1 | 0.61 | 0.79 | 0.83 | 4,594.04 | | | | |
| altamira | 26/06/201 | 1 | 0.55 | 0.69 | 0.57 | 3,028.14 | | | | |
| altamira | 12/07/201 | 1 | 1.06 | 0.77 | 0.76 | 4,153.24 | | | | |
| altamira | 28/07/201 | 1 | 0.75 | 0.70 | 0.57 | 3,101.17 | | | | |
| altamira | 13/08/201 | 1 | 0.68 | 0.72 | 0.65 | 3,344.00 | | | | |
| altamira | 29/08/201 | 1 | 0.68 | 0.76 | 0.74 | 4,035.23 | | | | |
| altamira | 05/09/201 | 1 | 0.79 | | | | 0.81 | 0.80 | 4,377.34 | 56.00 |
| altamira | 30/09/201 | 1 | 0.65 | 0.79 | 0.86 | 4,678.32 | | | | |
| altamira | 17/11/201 | 1 | 0.57 | 0.68 | 0.55 | 3,101.08 | | | | |
| aguas claras | 09/05/201 | 1 | 0.67 | 0.76 | 0.75 | 3,275.38 | | | | |
| aguas claras | 25/05/201 | 1 | 0.53 | 0.83 | 0.95 | 3,810.23 | | | | |
| aguas claras | 10/06/201 | 1 | 0.47 | 0.79 | 0.84 | 3,205.31 | | | | |
| aguas claras | 26/06/201 | 1 | 0.62 | 0.68 | 0.54 | 1,946.26 | | | | |
| aguas claras | 12/07/201 | 1 | 0.80 | 0.80 | 0.89 | 3,170.02 | | | | |
| aguas claras | 19/07/201 | 1 | 0.80 | | | | 0.83 | 0.88 | 3,239.69 | 56.00 |
| aguas claras | 28/07/201 | 1 | 0.90 | 0.77 | 0.80 | 2,743.25 | | | | |
| aguas claras | 13/08/201 | 1 | 0.85 | 0.80 | 0.89 | 3,216.44 | | | | |

| | | | | | | | | | | |
|-------------------|-----------|---|------|------|------|----------|------|------|----------|-------|
| aguas claras | 29/08/201 | 1 | 0.86 | 0.78 | 0.80 | 2,893.14 | | | | |
| aguas claras | 05/09/201 | 1 | 0.86 | | | | 0.69 | 0.61 | 3,823.92 | 56.00 |
| aguas claras | 30/09/201 | 1 | 0.76 | 0.80 | 0.90 | 3,768.52 | | | | |
| aguas claras | 12/10/201 | 1 | | | | | | | | |
| aguas claras | 19/12/201 | 1 | | 0.77 | 0.80 | 5,793.40 | | | | |
| aguas claras baja | 09/05/201 | 1 | 0.71 | 0.76 | 0.72 | 4,613.59 | | | | |
| aguas claras baja | 25/05/201 | 1 | 0.65 | 0.81 | 0.95 | 6,222.93 | | | | |
| aguas claras baja | 10/06/201 | 1 | 0.64 | 0.79 | 0.83 | 5,453.58 | | | | |
| aguas claras baja | 26/06/201 | 1 | 0.78 | 0.69 | 0.54 | 3,467.73 | | | | |
| aguas claras baja | 03/07/201 | 1 | 0.78 | | | | 0.32 | 0.20 | 1,442.91 | 56.00 |
| aguas claras baja | 12/07/201 | 1 | 0.89 | 0.80 | 0.89 | 5,841.45 | | | | |
| aguas claras baja | 28/07/201 | 1 | | 0.79 | 0.84 | 5,495.96 | | | | |
| aguas claras baja | 13/08/201 | 1 | 0.73 | 0.80 | 0.89 | 5,830.14 | | | | |
| aguas claras baja | 29/08/201 | 1 | 0.89 | 0.79 | 0.83 | 3,665.40 | | | | |
| aguas claras baja | 05/09/201 | 1 | 0.98 | | | | 0.98 | 0.95 | 6,524.24 | 56.00 |
| aguas claras baja | 30/09/201 | 1 | 0.95 | 0.71 | 0.60 | 3,838.10 | | | | |
| aguas claras baja | 19/12/201 | 1 | | 0.66 | 0.49 | 2,747.48 | | | | |

Tabla 14 Anexo 3Eventos por predio, aforos e imágenes Modis y Landsat

| Posada de los llanos baja | | | | Posada de los llanos (1) | | | |
|---------------------------|-------|-------|---------|--------------------------|-------|-------|---------|
| Fecha | Aforo | MODIS | Landsat | Posada de lo | Aforo | Modis | Landsat |
| 20/05/2011 | x | | | 09/05/2011 | | x | |
| 23/05/2011 | x | | | 20/05/2011 | x | | |
| 25/05/2011 | | x | | 23/05/2011 | x | | |
| 20/06/2011 | x | | | 25/05/2011 | | x | |
| 23/06/2011 | x | | | 20/06/2011 | x | | |
| 12/07/2011 | | x | | 23/06/2011 | x | | |
| 19/07/2011 | | | 56 | 12/07/2011 | | x | |
| 28/07/2011 | | x | | 28/07/2011 | | x | |
| 13/08/2011 | | x | | 13/08/2011 | | x | |
| 14/08/2011 | x | | | 14/08/2011 | x | | |
| 17/08/2011 | x | | | 17/08/2011 | x | | |
| 29/08/2011 | | x | | 29/08/2011 | | x | |
| 05/09/2011 | | | 56 | 13/09/2011 | x | | |
| 13/09/2011 | x | | | 16/09/2011 | x | | |
| 16/09/2011 | x | | | 10/10/2011 | x | | |
| 10/10/2011 | x | | | 13/10/2011 | x | | |
| 13/10/2011 | x | | | 01/11/2011 | x | | |
| 01/11/2011 | x | | | 04/11/2011 | x | | |
| 04/11/2011 | x | | | 03/12/2011 | | x | |

| La carlota | | | |
|------------|-------|-------|---------|
| | Aforo | Modis | Landsat |
| 04/05/2011 | x | | |
| 07/05/2011 | x | | |
| 09/05/2011 | | x | |
| 25/05/2011 | | x | |
| 10/06/2011 | | x | |
| 11/06/2011 | x | | |
| 14/06/2011 | x | | |
| 26/06/2011 | | x | |
| 11/07/2011 | x | | |
| 12/07/2011 | | x | |
| 14/07/2011 | x | | |
| 28/07/2011 | | x | |
| 07/08/2011 | x | | |
| 10/08/2011 | x | | |
| 13/08/2011 | | x | |
| 29/08/2011 | | x | |
| 11/09/2011 | x | | |
| 14/09/2011 | x | | |
| 30/09/2011 | | x | |
| 09/10/2011 | x | | |
| 12/10/2011 | x | | |
| 01/11/2011 | | x | |
| 08/11/2011 | x | | |
| 11/11/2011 | x | | |
| 17/11/2011 | | x | |
| 01/12/2011 | x | | |
| 03/12/2011 | | x | |
| 04/12/2011 | x | | |
| 19/12/2011 | | x | |

| La almeria baja | | | |
|-----------------|-------|-------|---------|
| | Aforo | Modis | Landsat |
| 09/05/2011 | | x | |
| 13/05/2011 | x | | |
| 16/05/2011 | x | | |
| 25/05/2011 | | x | |
| 10/06/2011 | | x | |
| 13/06/2011 | x | | |
| 16/06/2011 | x | | |
| 26/06/2011 | | x | |
| 19/07/2011 | x | | |
| 22/07/2011 | x | | |
| 28/07/2011 | | x | |
| 04/08/2011 | | | 55 |
| 13/08/2011 | | x | |
| 22/08/2011 | x | | |
| 25/08/2011 | x | | |
| 29/08/2011 | | x | |
| 05/09/2011 | | | 55-56 |
| 23/09/2011 | x | | |
| 26/09/2011 | x | | |
| 23/10/2011 | x | | |
| 26/10/2011 | x | | |
| 01/11/2011 | | x | |
| 19/11/2011 | x | | |
| 22/11/2011 | x | | |
| 03/12/2011 | | x | |
| 19/12/2011 | | x | |

| La almeria alta | | | |
|-----------------|-------|-------|---------|
| | Aforo | Modis | Landsat |
| 13/ 05/ 2011 | x | | |
| 16/ 05/ 2011 | x | | |
| 25/ 05/ 2011 | | x | |
| 10/ 06/ 2011 | | x | |
| 13/ 06/ 2011 | x | | |
| 16/ 06/ 2011 | x | | |
| 26/ 06/ 2011 | | x | |
| 19/ 07/ 2011 | x | | |
| 22/ 07/ 2011 | x | | |
| 28/ 07/ 2011 | | x | |
| 13/ 08/ 2011 | | x | |
| 22/ 08/ 2011 | x | | |
| 25/ 08/ 2011 | x | | |
| 29/ 08/ 2011 | | x | |
| 05/ 09/ 2011 | | | 55-56 |
| 23/ 09/ 2011 | x | | |
| 26/ 09/ 2011 | x | | |
| 23/ 10/ 2011 | x | | |
| 26/ 10/ 2011 | x | | |
| 01/ 11/ 2011 | | x | |
| 19/ 11/ 2011 | x | | |
| 22/ 11/ 2011 | x | | |
| 03/ 12/ 2011 | | x | |
| 19/ 12/ 2011 | | x | |

| San gabriel | | | |
|--------------|-------|-------|---------|
| | Aforo | Modis | Landsat |
| 09/ 05/ 2011 | | x | |
| 20/ 05/ 2011 | x | | |
| 23/ 05/ 2011 | x | | |
| 25/ 05/ 2011 | | x | |
| 19/ 06/ 2011 | x | | |
| 22/ 06/ 2011 | x | | |
| 12/ 07/ 2011 | | x | |
| 18/ 07/ 2011 | x | | |
| 21/ 07/ 2011 | x | | |
| 28/ 07/ 2011 | | x | |
| 13/ 08/ 2011 | | x | |
| 14/ 08/ 2011 | x | | |
| 17/ 08/ 2011 | x | | |
| 29/ 08/ 2011 | | x | |
| 05/ 09/ 2011 | | | 56 |
| 10/ 10/ 2011 | x | | |
| 13/ 10/ 2011 | x | | |
| 03/ 12/ 2011 | | x | |

| El comun | | | | Buenavista | | | |
|------------|-------|-------|---------|------------|-------|-------|---------|
| | Aforo | Modis | Landsat | | Aforo | Modis | Landsat |
| 09/05/2011 | | x | | 09/05/2011 | | x | |
| 24/05/2011 | x | | | 25/05/2011 | | x | |
| 25/05/2011 | | x | | 28/05/2011 | x | | |
| 27/05/2011 | x | | | 31/05/2011 | x | | |
| 21/06/2011 | x | | | 10/06/2011 | | x | |
| 24/06/2011 | x | | | 25/06/2011 | x | | |
| 26/06/2011 | | x | | 26/06/2011 | | x | |
| 12/07/2011 | | x | | 28/06/2011 | x | | |
| 19/07/2011 | | | 55-56 | 12/07/2011 | | x | |
| 23/07/2011 | x | | | 19/07/2011 | | | 56 |
| 26/07/2011 | x | | | 28/07/2011 | | x | |
| 28/07/2011 | | x | | 29/07/2011 | x | | |
| 13/08/2011 | | x | | 01/08/2011 | x | | |
| 22/08/2011 | x | | | 13/08/2011 | | x | |
| 25/08/2011 | x | | | 28/08/2011 | x | | |
| 29/08/2011 | | x | | 29/08/2011 | | x | |
| 22/09/2011 | x | | | 31/08/2011 | x | | |
| 25/09/2011 | x | | | 05/09/2011 | | | 56 |
| 30/09/2011 | | x | | 26/09/2011 | x | | |
| 23/10/2011 | x | | | 29/09/2011 | x | | |
| 26/10/2011 | x | | | 30/10/2011 | x | | |
| 01/11/2011 | | x | | 02/11/2011 | x | | |
| 19/11/2011 | x | | | 18/11/2011 | x | | |
| 22/11/2011 | x | | | 21/11/2011 | x | | |
| 14/12/2011 | x | | | 03/12/2011 | | x | |
| 17/12/2011 | x | | | 10/12/2011 | x | | |
| 19/12/2011 | | x | | 13/12/2011 | x | | |

| Altamira | | | |
|------------|-------|-------|---------|
| | Aforo | Modis | Landsat |
| 21/05/2011 | x | | |
| 24/05/2011 | x | | |
| 25/05/2011 | | x | |
| 10/06/2011 | | x | |
| 20/06/2011 | x | | |
| 23/06/2011 | x | | |
| 26/06/2011 | | x | |
| 12/07/2011 | | x | |
| 16/07/2011 | x | | |
| 19/07/2011 | x | | |
| 28/07/2011 | | x | |
| 13/08/2011 | | x | |
| 19/08/2011 | x | | |
| 22/08/2011 | x | | |
| 29/08/2011 | | x | |
| 05/09/2011 | | | 56 |
| 27/09/2011 | x | | |
| 30/09/2011 | x | x | |
| 22/10/2011 | x | | |
| 25/10/2011 | x | | |
| 17/11/2011 | | x | |
| 19/11/2011 | x | | |
| 22/11/2011 | x | | |
| 17/12/2011 | x | | |
| 20/12/2011 | x | | |

| Aguasclaras | | | |
|-------------|-------|-------|---------|
| | Aforo | Modis | Landsat |
| 09/05/2011 | | x | |
| 10/05/2011 | x | | |
| 13/05/2011 | x | | |
| 25/05/2011 | | x | |
| 10/06/2011 | x | x | |
| 13/06/2011 | x | | |
| 26/06/2011 | | x | |
| 12/07/2011 | x | x | |
| 15/07/2011 | x | | |
| 19/07/2011 | | | 56 |
| 28/07/2011 | | x | |
| 08/08/2011 | x | | |
| 11/08/2011 | x | | |
| 13/08/2011 | | x | |
| 29/08/2011 | | x | |
| 05/09/2011 | | | 56 |
| 17/09/2011 | x | | |
| 20/09/2011 | x | | |
| 30/09/2011 | | x | |
| 12/10/2011 | x | | |
| 15/10/2011 | x | | |
| 15/11/2011 | x | | |
| 18/11/2011 | x | | |
| 20/11/2011 | x | | |
| 23/11/2011 | x | | |
| 19/12/2011 | | x | |

| Aguas claras baja | | | |
|-------------------|-------|-------|---------|
| | Aforo | Modis | Landsat |
| 09/05/2011 | | x | |
| 10/05/2011 | x | | |
| 13/05/2011 | x | | |
| 25/05/2011 | | x | |
| 10/06/2011 | x | x | |
| 13/06/2011 | x | | |
| 26/06/2011 | | x | |
| 03/07/2011 | | | 56 |
| 12/07/2011 | x | x | |
| 15/07/2011 | x | | |
| 28/07/2011 | | x | |
| 08/08/2011 | x | | |
| 11/08/2011 | x | | |
| 13/08/2011 | | x | |
| 29/08/2011 | | x | |
| 05/09/2011 | | | 56 |
| 17/09/2011 | x | | |
| 20/09/2011 | x | | |
| 30/09/2011 | | x | |
| 12/10/2011 | x | | |
| 15/10/2011 | x | | |
| 15/11/2011 | x | | |
| 18/11/2011 | x | | |
| 20/11/2011 | x | | |
| 23/11/2011 | x | | |
| 19/12/2011 | | x | |

Tabla 15 Anexo 4 Biomasa MS medida para predios de la validación

| Muestra | Periodo de Descanso | Municipio | Fecha de Visita oferta | Oferta M. Seca (kg/m²) | Fecha de Visita Rechazo | Rechazo M. Seca (kg/m²) |
|----------------|----------------------------|------------------|-------------------------------|--|--------------------------------|---|
| 1 | 45 | San Pedro | 10/05/2011 | 0.796 | 13/05/2011 | 0.536 |
| 2 | 42 | San Pedro | 10/06/2011 | 0.527 | 13/06/2011 | 0.444 |
| 3 | 37 | San Pedro | 12/07/2011 | 0.951 | 15/07/2011 | 0.826 |
| 4 | 39 | San Pedro | 08/08/2011 | 1.038 | 11/08/2011 | 0.694 |
| 5 | 45 | San Pedro | 17/09/2011 | 1.162 | 20/09/2011 | 0.897 |
| 6 | 43 | San Pedro | 12/10/2011 | 0.630 | 15/10/2011 | 0.518 |
| 7 | 39 | San Pedro | 15/11/2011 | 0.869 | 18/11/2011 | 0.676 |
| 8 | 36 | San Pedro | 20/11/2011 | 1.144 | 23/11/2011 | 0.422 |
| 1 | 35 | San Pedro | 27/05/2011 | 1.257 | 30/05/2011 | 0.700 |
| 2 | 35 | San Pedro | 26/06/2011 | 1.030 | 29/06/2011 | 0.725 |
| 3 | 35 | San Pedro | 24/07/2011 | 1.073 | 27/07/2011 | 0.870 |
| 4 | 35 | San Pedro | 22/08/2011 | 1.022 | 25/08/2011 | 0.868 |
| 5 | 35 | San Pedro | 23/09/2011 | 1.192 | 26/09/2011 | 0.855 |
| 6 | 35 | San Pedro | 23/10/2011 | 1.009 | 26/10/2011 | 0.683 |
| 7 | 35 | San Pedro | 18/11/2011 | 0.777 | 21/11/2011 | 0.657 |
| 8 | 35 | San Pedro | 04/12/2011 | 1.006 | 07/12/2011 | 0.828 |

Tabla 16 Anexo 5 Datos usados en la validación de BAP promedio, NDVI, SR, y APAR tanto Modis como Landsat por predio

| | | | Landsat | | | |
|-----------|------------|--------------|---------|------|----------|-----|
| Hato | Fecha | BAP promedio | ND VI | SR | APAR | row |
| Pulgarina | 03/07/2011 | 0.88 | 0.64 | 0.51 | 3,507.20 | 56 |
| Pulgarina | 19/07/2011 | 1.12 | 0.85 | 0.92 | 7,188.55 | 55 |
| Pulgarina | 19/07/2011 | 1.12 | 0.86 | 0.92 | 7,618.75 | 56 |
| Pulgarina | 04/08/2011 | 1.00 | 0.84 | 0.89 | 6,290.45 | 55 |
| Pulgarina | 05/09/2011 | 1.03 | 0.85 | 0.85 | 5,725.15 | 55 |
| Pulgarina | 05/09/2011 | 1.03 | 0.94 | 0.93 | 6,199.21 | 56 |
| Horizonte | 19/07/2011 | 0.89 | 0.76 | 0.73 | 3,125.60 | 56 |
| Horizonte | 05/09/2011 | 0.93 | 0.81 | 0.76 | 3,330.01 | 56 |

