

UNIVERSIDAD NACIONAL AGRARIA

LA MOLINA

FACULTAD DE CIENCIAS



**“ESTIMACIÓN DE LA BIOMASA VEGETAL AÉREA MEDIANTE
TELEDETECCIÓN CALIBRADA CON UN MÉTODO
DESTRUCTIVO EN CAJATAMBO, LIMA”**

Presentada por:

GONZALO ALONSO NÚÑEZ VILCA

Tesis para Optar el Título Profesional de:

BIÓLOGO

Lima – Perú

2022

La UNALM es la titular de los derechos patrimoniales de la presente investigación
(Art. 24. Reglamento de Propiedad Intelectual)

**UNIVERSIDAD NACIONAL AGRARIA
LA MOLINA**

FACULTAD DE CIENCIAS

**“ESTIMACIÓN DE LA BIOMASA VEGETAL AÉREA MEDIANTE
TELEDETECCIÓN CALIBRADA CON UN MÉTODO
DESTRUCTIVO EN CAJATAMBO, LIMA”**

Presentada por:

GONZALO ALONSO NÚÑEZ VILCA

Tesis para Optar el Título Profesional de:

BIÓLOGO

Sustentada y aprobada por el siguiente jurado:

Cs. Juan Jesús Torres Guevara
PRESIDENTE

Mg.Sc. Víctor Manuel Barrena Arroyo
MIEMBRO

Blga. Gladys Tello Cerón
MIEMBRO

Mg. Sc. Diana Zulema Quinteros Carlos
ASESORA

Dr. Ernesto Ever Menacho Casimiro
Co Asesor

DEDICATORIA

A las almas libres, creativas e inconformes a quienes por su curiosidad han llegado a este trabajo de investigación.

AGRADECIMIENTOS

A mis padres por su apoyo. A mi querida enamorada Romy por su apoyo emocional sin el cual no hubiera concluido con este trabajo de investigación. A Zulema Quinteros, profesora y amiga, por su incondicional apoyo académico y emotivo. Sin el cual esta investigación nunca se hubiera realizado. A Edgar Sánchez por sus enseñanzas y aportes, sin los cuales no hubiera concluido el grado de biología. Se convierto en una luz entre la neblina. A la profesora Wetzell quien me apoyó en desde un primer momento y creyó en mí. A mis amigos del Laboratorio de Ecología Aplicada Zarela, Hernán, Julio y Pablo mis compañeros de diferentes aventuras. A los estudiantes del curso de Herramientas para la descripción de Ecosistemas, a Jordan, Lucero, Yazmin, Roberto, Angie entre otros por su valioso aporte en campo. A los estudiantes del curso de posgrado de Prácticas de Ecología Aplicada a Gladys, Karen, Rodrigo, Karen, Yumi y otros por su valioso aporte en campo. Al Laboratorio de Ecología de Procesos de la Facultad de Ciencias de la UNALM por facilitarme sus instalaciones para el procesamiento de las muestras. Al Laboratorio de Teledetección aplicada y SIG de la Facultad de Ciencias Forestales de la UNALM por facilitarme la adquisición de las imágenes satelitales.

ÍNDICE GENERAL

RESUMEN	ix
ABSTRACT	x
I. INTRODUCCIÓN	1
II. REVISIÓN DE LITERATURA	5
2.1. Algunos antecedentes	5
2.2. Terminología para la biomasa vegetal	7
2.3. Fotosíntesis	7
2.4. Biomasa vegetal y su función ecológica	8
2.5. Producción primaria y métodos de estimación	9
2.6. Factores que regulan la producción primaria	10
2.6.1. Flujos de energía y ciclos de materia en los ecosistemas	10
2.6.2. Sucesión	11
2.7. Relación entre la diversidad y la estabilidad	12
2.8. Espacio geográfico en ecología	13
2.8.1. La “naturaleza” del ambiente	13
2.8.2. Heterogeneidad espacial	14
2.8.3. Fronteras	15
2.8.4. Mapa ecológico del paisaje y mapas de unidades terrestre	15
2.8.5. Muestreo de la vegetación	15
2.9. Teledetección	17
2.9.1. Terminología en teledetección	17
2.9.2. Fundamentos de la teledetección	20
2.9.3. Sistemas satélites de teledetección	27
2.9.4. Índices de vegetación	30
2.10. Descripción de los sistemas satelitales y combinación de bandas	32
2.10.1. Sistemas satelitales LANDSAT 8, SENTINEL-2 y SPOT-6 ...	32
2.10.2. Combinación de bandas espectrales	35

2.11	Fundamentos de los Sistemas de información geográfica	37
2.11.1.	Definición.....	37
2.11.2.	Uso de los SIG en Ecología	37
2.11.3.	Elementos de los sistemas de información geográfica	38
2.11.4.	Modelos de representación de los datos geográficos.....	39
2.11.5.	Operaciones con un sistema de información geográfico	39
2.11.6.	Manejo de datos espaciales	41
2.11.7.	Fuentes de error	42
III.	MATERIALES Y MÉTODOS.....	43
3.1.	Equipos y materialesg.....	44
3.2.	Área de estudio.....	45
3.3.	Métodos	47
3.3.1.	Ubicación y caracterización de las parcelas de muestreo	47
3.3.2.	Cosecha de la biomasa vegetal aérea	49
3.3.3.	Secado de las alícuotas de biomasa	52
3.3.4.	Cálculo de los índices de vegetación	53
3.3.5.	Análisis estadísticos	57
3.3.6.	Elaboración de mapas	59
IV.	RESULTADOS Y DISCUSIONES.....	64
4.1.	Ubicación de puntos de muestreo.....	64
4.2.	Caracterización de las parcelas: morfología, estructura, fisionomía e identificación de especies dominantes.....	65
4.3.	Selección de la parcela optima	72
4.4.	Análisis espacial de los datos de biomasa	75
4.5.	Cálculo de los índices de vegetación.....	78
4.6.	Modelo de estimación de la biomasa vegetal aérea por índices de vegetación	86
4.7.	Selección del modelo	105
4.8.	Mapa de vegetación.....	106

4.9. Mapa de biomasa vegetal aérea.....	108
4.10. Mapa de biomasa vegetal estimada como instrumento en el marco de la gestión ambiental.....	110
V. CONCLUSIONES.....	111
VI. RECOMENDACIONES.....	112
VII. BIBLIOGRAFÍA.....	113
VIII. ANEXOS.....	127

ÍNDICE DE TABLAS

Tabla 1: Descripción de las bandas espectrales del satélite LANDSAT 8	33
Tabla 2: Descripción de las bandas espectrales de la Misión SENTINEL-2A	34
Tabla 3: Descripción de las bandas espectrales de los satélites 6/7	35
Tabla 4: Valores empíricos para el área mínima de la parcela	49
Tabla 5: Mapas Auxiliares	63
Tabla 6: Distribución de los puntos de muestreo.....	64
Tabla 7: Valores de la gráfica de coeficiente de variación y tamaño de parcela.....	74
Tabla 8: Estadísticos descriptivos de los pesos secos (g MSV/m ²) para la parcela 2m ²	75
Tabla 9: Prueba de normalidad de Shapiro-Wilk para el peso seco de la biomasa	86
Tabla 10: Prueba de normalidad de Shapiro-Wilk para índice NDVI.....	87
Tabla 11: Prueba de normalidad de Shapiro-Wilk para índice ARVI	87
Tabla 12: Prueba de normalidad de Shapiro-Wilk para índice MAVI	88
Tabla 13: Prueba de normalidad de Shapiro-Wilk para índice SAVI.....	89
Tabla 14: Prueba de normalidad de Shapiro-Wilk para índice SARVI	89
Tabla 15: Prueba de normalidad de Shapiro-Wilk para índice OSAVI.....	90
Tabla 16: Prueba de normalidad de Shapiro-Wilk para índice EVI	91
Tabla 17: Coeficientes de correlación entre peso e índice NDVI	91
Tabla 18: Coeficientes de correlación entre peso e índice ARVI.....	92
Tabla 19: Coeficientes de correlación entre peso e índice MAVI.....	92
Tabla 20: Coeficientes de correlación entre peso e índice SAVI	93
Tabla 21: Coeficientes de correlación entre peso e índice SARVI	93
Tabla 22: Coeficientes de correlación entre peso e índice OSAVI	94
Tabla 23: Coeficientes de correlación entre peso e índice EVI.....	94
Tabla 24: Significancia de la correlación.....	95
Tabla 25: Coeficiente de determinación	95
Tabla 26: ANOVA - SAVI para SPOT 7m.....	96

Tabla 27: Coeficientes - SAVI para SPOT 7m.....	96
Tabla 28: ANOVA - SARVI para SPOT 7m	98
Tabla 29: Coeficientes - SARVI para SPOT 7m.....	98
Tabla 30: ANOVA - OSAVI para SPOT 7m.....	100
Tabla 31: Coeficientes - OSAVI para SPOT 7m.....	100
Tabla 32: ANOVA - EVI para SPOT 7m	102
Tabla 33: Coeficientes - EVI para SPOT 7m.....	102
Tabla 34: Normalidad de los residuos - Test de Shapiro-Wilk	104
Tabla 35: Prueba de homocedasticidad - test de Breusch-Pagan	105
Tabla 36: Prueba de independencia de los residuos - test de Durbin-Watson	105
Tabla 37: Cuadrado medio del error	106
Tabla 38: Descripción de las formaciones vegetales	106
Tabla 39: Clasificación de los puntos de muestreo.....	107

ÍNDICE DE FIGURAS

Figura 1. Espectro de absorción de algunos pigmentos fotosintéticos.	8
Figura 2. Espectro electromagnético. Nota: longitud de onda (λ) en metros	20
Figura 3. Bandas de absorción atmosférica	23
Figura 4. Descomposición de la luz a través de un prisma	23
Figura 5. Ejemplos del comportamiento espectral de diferentes elementos.	24
Figura 6. Transmitancia, reflectancia y absorbancia.	24
Figura 7. Firmas espectrales de algunas especies vegetales.....	26
Figura 8. Espectro de reflectancia, transmitancia y absorbancia de las plantas	26
Figura 9. Mapa de la localidad del distrito de Cajatambo.....	45
Figura 10. Mapa de la cuenca hidrológica de la zona de estudio.	46
Figura 11. Ubicación, delimitación y cosecha de los puntos de muestreo.....	48
Figura 12. Ubicación y delimitación de los puntos de muestreo.....	50
Figura 13. Cosecha de los puntos de muestreo.....	51
Figura 14. Cosecha de los puntos de muestreo.....	51
Figura 15. Embalaje y rotulado de las alícuotas	51
Figura 16. Bolsas de papel con las alícuotas en gabinete.	52
Figura 17. Resumen de la elaboración del mapa de biomasa estimada	60
Figura 18. Resumen de la elaboración del mapa de coberturas vegetales	61
Figura 19. Ubicación de los puntos de muestreo	65
Figura 20. Ubicación del punto de muestreo A1	66
Figura 21. Ubicación del punto de muestreo A2	67
Figura 22. Ubicación del punto de muestreo A3	68
Figura 23. Ubicación del punto de muestreo C1	69
Figura 24. Ubicación del punto de muestreo M1	70
Figura 25. Ubicación del punto de muestreo M2	71
Figura 26. Ubicación del punto de muestreo C2	71
Figura 27. Ubicación del punto de muestreo Max1	72

Figura 28. Diagrama de cajas y bigotes.	73
Figura 29. Coeficiente de variación y tamaño de parcela de orientación horizontal.....	74
Figura 30. Histograma y Densidad del Kernel	75
Figura 31. Reporte de autocorrelación espacial para el índice I de Moran.....	76
Figura 32. Semivariograma	77
Figura 33. Estadísticos del semivariograma.....	77
Figura 34. Modelo de interpolación de Krigging	77
Figura 35. Mapa e histograma para el NDVI	79
Figura 36. Mapa e histograma para el ARVI	80
Figura 37. Mapa e histograma para el MAVI.....	81
Figura 38. Mapa e histograma para el SAVI.....	82
Figura 39. Mapa e histograma para el OSAVI	83
Figura 40. Mapa e histograma para el SARVI	84
Figura 41. Mapa e histograma para EVI.....	86
Figura 42. Verificación de Supuestos – SAVI para SPOT 7m.....	97
Figura 43. Gráfica de la regresión Peso-SAVI_SP7.....	97
Figura 44. Verificación de Supuestos – SARVI para SPOT 7m.....	99
Figura 45. Gráfica de la regresión Peso-SARVI_SP7	99
Figura 46. Verificación de Supuestos – OSAVI para SPOT 7m.....	101
Figura 47. Gráfica de la regresión Peso-OSAVI_SP7.....	101
Figura 48. Verificación de Supuestos – EVI para SPOT 7m.....	103
Figura 49. Gráfica de la regresión Peso-EVI_SP7	103
Figura 50. Mapa de clasificación de la vegetación - Parte 1.....	107
Figura 51. Mapa de clasificación de la vegetación - Parte 2.....	108
Figura 52. Mapa de biomasa vegetal aérea - Parte 1	109
Figura 53. Mapa de biomasa vegetal aérea - Parte 2	109

ÍNDICE DE ANEXOS

Anexo 1. Ficha para la recolección de biomasa en Campo.....	128
Anexo 2. Etiqueta para la bolsa de la alícuota.....	128
Anexo 3. Ficha para la recolección de los datos en gabinete.	128
Anexo 4. Ficha informativa para las capacitaciones de los colaboradores en campo y gabinete.	129
Anexo 5. Propuesta de Clasificación de formas de crecimiento para el distrito de Cajatambo.....	130
Anexo 6. Resumen de los símbolos de las formas de vida basado en Dansereau.	131
Anexo 7. Ejemplo de la aplicación del Danserograma.	132
Anexo 8. Sistema de clasificación fisionómica y estructural de la vegetación propuesta por Kùchler y Zonneveld.....	132
Anexo 9. Resumen de la clasificación fisionómica y estructural de la vegetación propuesta por Kùchler y Zonneveld.....	135
Anexo 10. Ficha de registro para el análisis estructural.....	136
Anexo 11. Resultados de las fichas de registros para el análisis estructural.....	137
Anexo 12. Resultados de las fichas del Danserograma	145
Anexo 13. Perfil altitudinal de la vegetación	146
Anexo 14. Datos de biomasa.	147
Anexo 15. Porcentajes de humedad.	148
Anexo 16. Datos de los índices de vegetación	148
Anexo 17. Código del software R.....	150
Anexo 18. Mapas en color verdadero y falso color.	156
Anexo 19. Mapas auxiliares.	160
Anexo 20. Solicitud de adquisición de la imagen SPOT 6	164

RESUMEN

En los últimos años ha habido una presión del capital natural por parte de la actividad antrópica pudiendo afectar la dinámica de los ecosistemas. Frente a esta problemática se hace necesario crear herramientas capaces de aportar información para la toma de decisiones en la gestión de los ecosistemas. Por lo tanto, dado que el estudio de la biomasa vegetal puede revelar parte de la dinámica ecosistémica y que mediante el uso del sensoramiento remoto y la cartografía, extendidos en el ámbito de la ecología, se tiene la capacidad de correlacionar las respuestas espectrales con parámetros biofísicos; el objetivo del presente trabajo de investigación fue plantear un modelo de estimación de la biomasa vegetal aérea a partir un índice de vegetación. Se usó un método destructivo para calcular el peso seco de la biomasa vegetal aérea muestreada en campo e imágenes satelitales de LANDSAT 8, SENTINEL-2 y SPOT 7 para el cálculo de los índices de vegetación. Posteriormente se calcularon varios modelos de regresión lineal para la estimación y se seleccionó el modelo que presentó el mejor ajuste de estimación y un menor RMSE. El índice EVI fue el elegido para la elaboración del mapa de biomasa estimada al presentar un R^2 de 0,43 y un RMSE de 10,006. El modelo es válido para la estimación de biomasa en las coberturas de praderas y matorrales no muy densos. Presentó dificultades para estimar la biomasa de ciertas coberturas vegetales debido a la saturación del índice de vegetación. El aporte del estudio ayudará al desarrollo de herramientas similares aplicados a la realidad nacional, así como destacar el uso de la teledetección como herramienta con varios usos en el campo de la ecología y en la gestión de ecosistemas.

Palabras claves: Teledetección, biomasa vegetal, método destructivo, índice de vegetación y EVI.

ABSTRACT

In recent years it has affected a pressure of natural capital by anthropic activity and may affect the trajectory of ecosystems. Front with this problem, it is necessary to create tools capable of carrying information for decision making. Nature management aims to maintain the properties of a theme ecosystem. The study of plant biomass can reveal part of the dynamics of the ecosystem. The use of the remote sensor and cartography has been extended in the field of ecology, becoming increasingly essential especially for its ability to correlate spectral responses with biophysical parameters. Therefore, the objective of this research work was to propose a model of estimate of aerial plant biomass to a vegetation index. A destructive method was used to calculate the dry weight of aerial plant biomass sampled in the countryside. Use the satellite images of LANDSAT 8, SENITNEL-2 and SPOT 7 to calculate vegetation indices. Later they calculated several linear regression models for the calculated one. The selection criterion was the model that presented a better estimate fit and a lower RMSE. The EVI index was chosen for the elaboration of the estimated biomass map when presenting an R^2 of 0,43 and an RMSE of 10,006. The model is valid for the biomass specification for grassland and scrubland not very dense. It presented difficulties in estimating the biomass of certain vegetation cover due to the saturation of the vegetation index. The contribution of the study will help the development of similar tools applied to the national reality. As well as highlighting the use of remote sensing as a tool with various uses in the field of ecology and ecosystem management.

Keywords: Remote sensing, plant biomass, destructive method, vegetation index and EVI.

I. INTRODUCCIÓN

«(...) Un ecólogo más interesado por la estructura abstracta y el dinamismo del ecosistema, considera estable un sistema que consigue mantener una biomasa similar y una producción similar, aunque al conseguirlo, frente a cambios reiterados del medio, implique alterar continuamente las proporciones de las distintas especies (...)» (Margalef 1982:696).

Las actividades antrópicas afectan a los ecosistemas produciendo cambios en el paisaje, pudiendo algunas afectaciones ser adversas para el ecosistema y para el hombre, mientras que otras pueden inducir procesos naturales de sucesión secundaria o de regeneración de las propiedades fisicoquímicas-biológicas del suelo para fines productivos (Margalef, 1982; Marten, 2001).

En las zonas andinas, en los últimos años, las prácticas tradicionales agrícolas se han modificado según la demanda del mercado, llevando a prácticas menos sostenibles y ocasionando cambios en el aspecto económico, social y ambiental (Pinedo et al., 2020; Chaiña, 2014). Una manifestación de lo anterior son los cambios en la cobertura del suelo producto de una mala gestión o falta de planificación del uso del territorio. Ello acarrea pérdida de áreas productivas o de los servicios ecosistémicos que se pueden observar haciendo un seguimiento y cuantificación del cambio del uso del suelo mediante la interpretación de imágenes satelitales, así como, recopilando información relevante relacionada a la gestión del territorio como variables topográficas, climáticas y edafológicas (Loza-Del Carpio & Taype-Huamán, 2021; Ramos & Tandazo, 2018).

El incremento del consumo debido a una explosión demográfica ejerce una presión de los servicios ambientales produciendo una reducción progresiva de la productividad debido a la pérdida de las capacidades del ecosistema. Un ecosistema puede regenerar sus capacidades de productivas, pero ello depende de su resiliencia, la capacidad de adaptación y la transformabilidad (Folke et al., 2010). La intensificación de la producción de alimentos, en especial en países en vías de desarrollo, puede originar la erosión, es decir, dejar el suelo sin la capacidad de mantener más cultivos (Marten, 2001). El servicio ambiental del ecosistema de ser

sumidero del CO₂ mantiene en funcionamiento la fotosíntesis, y en consecuencia los procesos ecológicos, así mismo este servicio es parte de los procesos de descontaminación atmosférico (metabolismo de los organismos, de los procesos fisicoquímicos abióticos y de las actividades antropogénicas) (Marten, 2001).

En el Artículo 2 numeral 22 de la Constitución Política del Perú (1993), “Toda persona tiene derecho a (...) gozar de un ambiente equilibrado y adecuado al desarrollo de su vida”, este derecho constitucional ha servido de base para la legislación ambiental peruana teniendo como matriz la Ley N° 28611 Ley General del Ambiente reforzando dicha visión en sus artículos 1 y 5; sin embargo, no toma en cuenta la dinámica inherente de un sistema ecológico, sus variaciones en el tiempo y el espacio, como los servicios ambientales, cambios en la diversidad biológica y procesos ecológicos; así mismo, no hay directrices sobre la gestión de las propiedades emergentes, ciclos adaptativos, homeorhesis o panarquía entre otros; a pesar de que algunos de estos conceptos son mencionados en las normas (Bunge, 2004; Farina, 2010; Holling, 1986; Holling & Gunderson, 2002; Margalef, 1993; Sánchez & Falero, 2015). Desde el año 2014 en el aspecto ambiental se ha tendido al relajamiento de la normativa por motivos económicos, en especial por la inversión privada en el sector minero, así como un lento y no vinculante ordenamiento territorial por parte de las instituciones gubernamentales (López, 2017).

Dado que la gestión de la naturaleza tiene como objetivo el mantener las propiedades, o trayectoria, de la naturaleza y, además, sea compatible con las actividades antrópicas (incluyen recreación, incendios, agricultura, pastoreo, minería entre otros). Por lo tanto, el fin de la gestión no es evitar los cambios inducidos, como se indica en la legislación ambiental peruana, si no se pretende generar conocimiento para el tomador de decisiones, en materia de cuánto y dónde los cambios se permitirán, y que acciones para su control. Además, no se contempla como una propiedad emergente las interacciones entre los procesos naturales y las actividades antrópicas. Se ha propuesto como alternativa los sistemas de Límites Aceptables de Cambio (LAC), es decir, la cantidad de cambio que el sistema puede resistir sin una afectación a sus propiedades; una forma de poder cuantificar los LAC es a partir del estudio de la dinámica del paisaje, como cambios en las formaciones vegetales y biomasa, entre otros. Con los LACs se puede evitar cambios indeseables, evaluar el desempeño de gestión, y es base para elaborar un sistema de alerta temprana de las afectaciones y realizar las medidas correctivas necesarias (Cole & McCool, 1998; Sánchez & Falero, 2015; Sánchez & Quinteros, 2017).

La resiliencia del ecosistema se puede observar en su capacidad de continuar el funcionamiento de los procesos naturales y proporcionar servicios ambientales dentro de un rango de usos y cambios. Por lo cual, se hace necesario la creación y calibración de instrumentos para la gestión de los ecosistemas. El contenido de carbono de la biomasa aérea vegetal es un parámetro de medición de una de las etapas del ciclo biogeoquímico del carbono y de especial interés biológico como el mantenimiento del ecosistema y los servicios ambientales. En este estudio se omite la biomasa vegetal subterránea al ser difícil su muestreo y cuantificación a pesar de su significancia ecológica. Es un tema pendiente que debe ser estudiado en investigaciones posteriores (Margalef, 1982; Marten, 2001).

En los últimos tiempos se ha ido incrementando los proyectos de inversión económica de diferentes sectores en el territorio nacional (Redacción EC, 2019). Estas actividades tienen un impacto en los ecosistemas. Además de los reportes de la existencia de un aumento de las temperaturas estudiadas a escala global, conocida coloquialmente como “Calentamiento Global” o “Cambio Climático”. Estas perturbaciones pueden ser estimadas por los cambios en la estructura vegetal a través de modelos propuestos a partir de los datos obtenidos de los sensores remotos (C. S. Holling, 1992; IPCC, 2013).

Las nuevas tecnologías de los sistemas de información geográfica y de la teledetección ofrecen varias ventajas y oportunidades de su aplicación en monitoreos de la vegetación permitiendo describir elementos como el dosel, la actividad fotosintética, producción de biomasa, entre otros en diferentes escalas. Permite establecer suposiciones sobre una correlación entre las respuestas espectrales y parámetros biofísicos. Con el monitoreo de la biomasa vegetal aérea se busca responder a las preguntas fundamentales para desarrollar formas más eficaces de gestión: ¿Cuál es la intensidad de uso de una zona? ¿Estamos sobreexplotando el servicio ambiental? ¿Qué lugares presentan una estructura vegetal similar? ¿Cuáles son las características críticas para su uso? (Baret et al., 1989; Baret & Guyot, 1991; Brown & Lugo, 1992; Escandon Calderón et al., 1999; C. S. Holling, 1992; IPCC, 2013; Marten, 2001; Zee & Huizing, 1988; Zhu & Liu, 2014). Según Cáceres et al. (2015) se ha realizado recopilaciones sobre los estados de vegetación y su comportamiento espectral para calibrar y validar la estimación de variables biofísicas a partir de datos de teledetección.

De lo anterior, se ha podido establecer índices de vegetación con múltiples aplicaciones en diferentes campos, con lo cual se ha propuesto modelos para diferentes fines. La presente investigación pretende contribuir en la inserción de dichos instrumentos en el manejo de los

agroecosistemas, monitoreos ecológicos, gestión de ecosistemas entre otros. Siendo de especial interés la aplicación para el estudio de la biomasa y cobertura vegetal que esta a su vez puede estar relacionada con valores de reflectancia (X. Zhu & Liu, 2014).

En ese sentido, la presente investigación de tipo exploratorio correlacional tiene como objetivo general “estimar la biomasa vegetal aérea mediante teledetección calibrada con un método destructivo” y como objetivos específicos: 1) Caracterizar la cobertura vegetal a partir de imágenes satelitales y de la observación directa en campo, 2) Seleccionar un modelo con mejor ajuste de estimación de la biomasa vegetal aérea 3) Estimar el contenido de biomasa vegetal aérea mediante el método destructivo y la teledetección para elaborar el mapa de biomasa vegetal aérea.

II. REVISIÓN DE LITERATURA

2.1 Antecedentes

Ónodi et al. (2017) opinan que las mediciones directas de la biomasa “*above-ground*” o sobre la superficie no son de fácil medición, por lo cual proponen usar “*proxies*” de biomasa para la calibración del NDVI (Índice de Vegetación de Diferencia Normalizada, por sus siglas en inglés) como estimador de la biomasa real. Para ello cosecharon la biomasa herbácea viva sobre el suelo para cada parcela y usaron modelos de regresión para evaluar las relaciones o “proxies” de biomasa y biomasa real entre los años 2003-2012. Uno de los resultados obtenidos indica que los “proxies” en años húmedos fueron más pronunciados que en los años secos y concluyeron que el uso de la relación proxy-biomasa en diferentes años o regímenes de precipitación pueden no ser válidos y se estaría introduciendo un error en las estimaciones de biomasa en estudios temporales de largo plazo.

Cáceres et al. (2015) en el trabajo “Análisis temporal de biomasa y stocks de carbono en un ecosistema de dehesa mediante imágenes Landsat, y su relación con factores climáticos”, realizaron un estudio de la estimación de los sumideros de carbono usando técnicas de teledetección, según indica el IPCC, el estudio se realizó en la provincia de Cáceres (España) entre los años 1985 y 2010. Se usaron las imágenes LANDSAT para estimar la cantidad de biomasa de pastos e inferir los stocks de carbono. Hubo una calibración en campo tomando cuatro parcelas dentro de su zona de estudio. Posterior a ello, se realizó una regresión lineal entre los datos de campo y los índices espectrales. El índice con mejor ajuste fue el índice EVI ($R^2 = 0,79$), seguido por SAVI ($R^2 = 0,78$) y NDVI ($R^2 = 0,73$). Describen que existe una sensibilidad a los cambios climáticos extremos en los valores promedio de biomasa y recomiendan usar las imágenes satelitales como estimador de variables biofísicas para evitar costosos muestreos en campo y en ocasiones impracticables en zonas muy agrestes.

Kross et al. (2015) en el trabajo “*Assessment of RapidEye vegetation indices for estimation of leaf area index and biomass in corn and soybean crops*” indican que el LAI (Índice de Área Foliar) y la biomasa son indicadores del desarrollo del cultivo y proporcionan

información relevante para la toma de decisiones. Realizaron un estudio para la estimación del LAI y biomasa seca “*above-ground*” o sobre la superficie usando imágenes de alta resolución de RapiEye para dos tipos de cultivos (maíz y soja). Se tomaron datos en campo para la calibración de las imágenes. Se usaron 7 índices de vegetación de los cuales el NDVI presenta un mejor desempeño para la estimación de la biomasa seca ($CV = 27$ por ciento y $r^2 = 0,90$) pero es insensible al tipo de cultivo. También los autores indicaron que la mayoría de los índices de vegetación usados se saturaron cuando la biomasa de la hoja era de aproximadamente 400 g/m^2 , y cuando la biomasa total era de alrededor de 800 g/m^2 . Concluyen que su trabajo demuestra el potencial del uso de imágenes de alta resolución para un monitoreo continuo del LAI.

En el trabajo “Estimación de biomasa aérea en Colombia a partir de imágenes MODIS” presentado por Anaya et al. (2008) proponen un método para aumentar el nivel de detalle en estimaciones regionales de biomasa aérea y cuantificar los cambios, especialmente asociados a incendios, usando imágenes MODIS. Consideran que la vegetación debe clasificarse en tres categorías: Pastizales, bosque primario y bosque secundario, debido a “que existe una fuerte relación entre la estructura y el funcionamiento de los ecosistemas”. Usan métodos alométricos para la estimación de la biomasa para bosques primarios y secundarios; y para la sabana (pastizales) usaron recolección de datos de otras fuentes bibliográficas. Emplearon los índices de vegetación: NDVI, SAVI y EVI. Para el modelo de estimación se usaron ecuaciones ajustadas a cada categoría. Concluyeron que el estudio de la biomasa en bosques secundarios es de difícil cuantificación en cuanto a su “separabilidad” y la extracción por uso maderero. Por otro lado, encontraron una alta correlación entre la biomasa de los pastizales y el índice EVI, por la sensibilidad del índice de detectar los cambios de la biomasa debido a fluctuaciones de la precipitación interanual. Además, afirman que se presenta valores más bajos de biomasa en época seca que en época de lluvias. Se alcanzó los objetivos de cuantificar la biomasa aérea para Colombia, estimada en 16195 millones de toneladas de biomasa, encontrándose dentro de los parámetros de estudio previos, pero con un mayor detalle en la distribución espacial.

Gasparri et al. (2007) en el trabajo “Utilidad de imágenes Landsat 7 ETM+ de diferentes fechas para la estimación de biomasa aérea en bosques subtropicales secos de Argentina”, realizaron un estudio multitemporal de la estimación de la biomasa en un bosque seco en el Parque Chaqueño en Argentina. Los datos se tomaron del Primer Inventario Nacional de Bosques Nativos de Argentina usando métodos alométricos y se correlacionaron con

los índices NDVI y SAVI. Concluyen que la estructura del bosque afecta las estimaciones de la biomasa, así mismo indican que el estudio de la biomasa a escala regional es importante para las estimaciones de cambios globales. También afirman que la mejor época para vincular los datos de biomasa y los datos satelitales es la estación seca, debido a los mecanismos fenológicos asociados con la disponibilidad de agua, teniendo un papel más crítico para el funcionamiento del ecosistema.

2.2 Terminología para la biomasa vegetal

Dióxido de carbono: Es un producto del metabolismo de los organismos y de ciertas actividades antrópicas. Constituye la estructura de los tejidos vegetales. Su concentración en la atmósfera es de aproximadamente el 0,036 por ciento de su composición (Perez Castellon et al., 2005).

Productores primarios: Transforman la energía proveniente de la luz del sol, en una serie de procesos fotosintéticos, usando dióxido de carbono, agua y oxígeno para la formación de cadenas de carbono, en cuyos enlaces se almacena la energía, para la construcción de tejidos, reserva entre otros (Marten, 2001).

Producción primaria neta: Es el crecimiento de todos los productores primarios. Es la fuente de materia orgánica y energía para los organismos; y proporciona material estructural al ecosistema (Margalef, 1982; Marten, 2001).

El aspecto vertical, o también llamado “perfil de la vegetación”, consiste en la descripción de las estructuras verticales de la vegetación de forma estratificada teniendo en cuenta cinco criterios: 1) tamaño, 2) forma, 3) cobertura o densidad, 4) composición florística y 5) composición de formas de vida.

El aspecto horizontal o “patrón” es el criterio más importante para una clasificación tipológica de la vegetación, por sus implicancias en la elaboración del mapeo, teniendo como principal tarea la definición de la unidad básica de homogeneidad.

2.3 Fotosíntesis

Es un proceso complejo por el cual los organismos vegetales forman compuestos orgánicos a partir del CO₂ atmosférico con el fin de almacenar la energía de la luz del sol, formar tejidos vegetales con diferentes funciones, entre otros (Margalef, 1982). Consta de reacciones luminosas y reacciones de carboxilación. Son tres procesos que regulan el proceso

óptimo de la fotosíntesis: la actividad de la Rubisco, regeneración de la rubulosa bifosfato y metabolismo de las triosas fosfato. La radiación absorbida depende del fotopigmento, los picos de la mayor actividad fotosintética están en los rangos de 450-475 nm y 650-675 nm, como se detalla en la Figura 1 el flujo de fotones fotosintéticos (PPF) es absorbido por las hojas constituyendo la fuente de energía utilizada en la fotosíntesis y determina la tasa de asimilación del CO₂ (Margalef, 1982; Taiz & Zeiger, 2004).

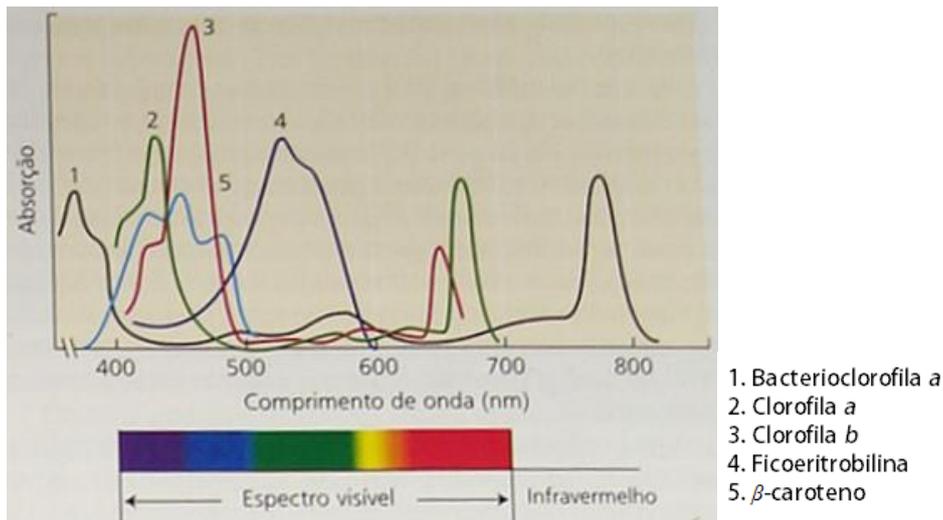


Figura 1. Espectro de absorción de algunos pigmentos fotosintéticos.
FUENTE: Tomado de Taiz y Zeiger 2004.

Existen diferentes pigmentos fotosintéticos, la clorofila a es la de mayor proporción en plantas de crecimiento y renovación rápido, y la clorofila b es la de mayor proporción en los estados de fenología madura. Esta característica permite realizar estudios de los cambios de las proporciones de los pigmentos mediante métodos de teledetección para la evaluación del estado actual, proceso sucesional entre otros (Margalef, 1982).

2.4 Biomasa vegetal y su función ecológica

Se denomina biomasa a la materia orgánica que se originó en un proceso biológico y que puede ser utilizado como fuente de energía (Odum, 1986). La biomasa vegetal es producida directamente por la actividad fotosintética de los organismos vegetales. En su estimación, frecuentemente, se omite la parte subterránea. La relación entre la parte aérea y subterránea varía dependiendo de la especie y del entorno, y esta relación es de importancia ecológica. Se suele expresar como el peso seco de materia vegetal, o materia seca vegetal, por unidad de superficie en una zona determinada. Se suele medir en g MSV/cm², g MSV/m², g MSV/ha o ton MSV/ha dependiendo de la densidad y abundancia de la

vegetación en el área de estudio (Margalef, 1982; Ónodi et al., 2017; X. Zhu & Liu, 2014). “La productividad es una de las características más interesantes de las comunidades” (Margalef 1982:454), de forma práctica se puede estimar la producción en base al aumento de la biomasa vegetal (Margalef, 1982). Se puede separar la biomasa según el compartimiento de almacenamiento en la planta: biomasa sobre la superficie o “*above-ground plant biomass*” (AGB) y biomasa subterránea (de difícil estimación). Adicionalmente se debe mencionar las reservas de biomasa en la vegetación muerta: hojarasca (hojas caídas sobre el suelo) y mantillo (materia orgánica en descomposición). Se debe tomar en cuenta que los cambios morfológicos y cambio de la composición de especies altera la biomasa de la zona. El estudio de la biomasa y su seguimiento en el tiempo pone en práctica todo el contenido de la ecología (Margalef, 1982; Ónodi et al., 2017; X. Zhu & Liu, 2014).

La biomasa vegetal de la superficie y la productividad primaria neta se encuentran entre las propiedades más importantes de los ecosistemas (Eisfelder et al., Knapp et al., McNaughton et al., citados por Ónodi et al. 2017). La biomasa vegetal sobre la superficie o “*aboveground plant biomass*” (AGB) tiene una importancia ecológica como una forma de cuantificar el carbono contenido en las estructuras vegetales aéreas (Ónodi et al., 2017; X. Zhu & Liu, 2014).

2.5 Producción primaria y métodos de estimación

La producción primaria tiene una relación directa con la superficie horizontal. En ecosistemas agrícolas la producción se estima mediante parcelas de cosecha, en contraste, en los ecosistemas naturales se hace dificultosa la cosecha por lo agreste del terreno y acceso. La estimación de la biomasa representa una dificultad importante para el estudio ecológico; por lo cual se hace necesario desarrollar metodologías más simplificados y con alto contenido empírico para una mejor cuantificación de la biomasa vegetal (Margalef, 1982).

Existen dos métodos para la estimación de la biomasa vegetal: método directo e indirecto. El método directo implica cosechar, separar, secar y pesar; es un proceso destructivo de la biomasa y debe ser considerado al momento del cálculo del tamaño y número de las parcelas de muestreo para minimizar la perturbación del ecosistema. El método indirecto,

es no destructivo, usa ecuaciones alométricas, sensorialmente remoto o mapas de cobertura. Sin embargo, se recomienda usar el método directo por tener una mayor precisión en la calibración y refinamiento que los métodos indirectos (Ónodi et al., 2017).

2.6 Factores que regulan la producción primaria

Según Taiz y Zeiger (2004) y Margalef (1982) son cuatro factores limitantes principales: la luz (las plantas usan una fracción de la luz disponible, relación directa con la producción primaria hasta alcanzar el punto de saturación de los fotosistemas), temperatura (regula la rapidez de la fotosíntesis, así como otros procesos que intervienen en la producción primaria, sin embargo, también aumenta la tasa de respiración), agua (por debajo de un límite mínimo de agua, propia para cada especie; se cierra los estomas impidiendo la entrada de CO₂, disminuye la actividad fotosintética y puede afectar la fisiología vegetal) y concentración de los elementos químicos (el CO₂, compuestos nitrogenados y fosfatos entre otros en concentración adecuadas permiten la fotosíntesis y otras rutas metabólicas actuando como sustrato o cofactor enzimático).

2.6.1 Flujos de energía y ciclos de materia en los ecosistemas

Los ecosistemas presentan dos propiedades emergentes importantes para su funcionamiento: ciclos de materia y flujos de energía; resultando en la producción y consumo de los ecosistemas. Estos flujos y ciclos proporcionan a los ecosistemas la habilidad de brindar “servicios ambientales”; servicios que están definidos principalmente en temas de supervivencia del ser humano y económicos. La luz del sol es la principal fuente de energía de los ecosistemas terrestres, sin embargo, a pesar de su baja calidad en términos de rendimiento, permite el funcionamiento de los procesos ecológicos. El flujo de la energía ingresa al ecosistema por la fotosíntesis de los productores primarios, siendo transferido a los otros niveles tróficos, y eventualmente siendo liberado en forma de radiación hacia el entorno. Por su parte el ciclo de la materia, presenta un movimiento continuo en el sistema en una especie de reciclado. Los más importantes ciclos para la fotosíntesis son: del carbono, oxígeno e hidrógeno. Siendo otros ciclos como del fósforo, nitrógeno entre otros para satisfacer los requerimientos metabólicos de los productores primarios (Marten, 2001; Odum, 1980; Rigler, 1980).

Parte de la materia del ecosistema puede ser retirado para satisfacer necesidades antrópicas, siendo deseable estudiar la resiliencia del ecosistema para una mejor gestión. En base a los insumos y egresos de la energía y de la materia del ecosistema terrestre se distinguen tres tipos: ecosistema natural, agrícola y urbano. En el caso de los ecosistemas agrícolas, se plantea reducir las etapas en la cadena alimenticia para canalizar la eficiencia de la producción primaria para consumo humano. Se debe tomar en cuenta varios factores para la gestión de dichos espacios (Marten, 2001).

2.6.2 Sucesión

La sucesión es el cambio que se produce en un ecosistema en el tiempo. Es una propiedad emergente del ecosistema. Para su estudio se basa en los cambios de las formaciones vegetales (estructura, producción, biomasa, diversidad, etc.) (Margalef, 1982; Marten, 2001).

Existe una relación casi proporcional entre biomasa vegetal y de respiración total. Relación según el cual varios autores definen los estados sucesionales del ecosistema. Mientras se mantenga una diferencia positiva entre la producción primaria y respiración total se logra una acumulación de la biomasa. El mencionado proceso de acumulación se mantiene hasta llegar a un aparente equilibrio entre la producción primaria y la respiración total, estado en el cual el ingreso y egreso de CO₂ es equivalente; y dependen de las condiciones ambientales y organización del ecosistema (Margalef, 1982).

Usualmente se clasifica la sucesión según sus características y las fuerzas que actúan: sucesión progresiva (ejemplo clásico, de una comunidad pionera a una comunidad “madura”, aumentando la productividad, biomasa, biodiversidad, etc.) y sucesión degradativa (de una comunidad “madura” hacia una comunidad más “simple” con una pérdida de especies, biomasa, productividad, etc.); sucesión primaria (comunidades pioneras en un nuevo sustrato) y sucesión secundario (reemplazo de una comunidad preexistente, común en campos abandonados agrícolas o zonas que tuvieron intervención antrópica); sucesión autogénica (por las fuerzas internas de las comunidades) y sucesión alogénico (las condiciones ambientales como fuerzas externas). No hay límites claros entre las diferentes clasificaciones, así como puede estar presente más un de tipo de sucesión en una zona. Existen discrepancias ente los autores sobre las diferencias conceptuales entre “estado maduro” y “clímax”, siendo a veces citado como sinónimos. Cabe mencionar que una comunidad “clímax” no implica que sea un ecosistema uniforme (Margalef, 1982; Marten, 2001; Odum, 1986; Richardson, 1977).

El ecosistema cambia de un estado hacia otro, variando sus propiedades, dinámica, productividad, etc. Las sucesiones inducidas por el hombre pueden resultar en una ventaja para su supervivencia o mejorar su calidad de vida sin que ello implique un impacto dañino al ecosistema. Se puede gestionar los procesos naturales para su mejor aprovechamiento, o el inicio de actividades económicas y sociales, y que funcionen en conjunto con el ecosistema. Se gestiona la resiliencia y la transformabilidad del ecosistema, como mover el sistema a un estado sucesional deseado, o atractor, siguiendo la trayectoria del ecosistema, u homeorhesis. En este principio reside el concepto del desarrollo adaptativo (Chapin et al., 2009). Además, se debe implementar normas institucionales y realizar un trabajo conjunto con los pobladores locales para la elaboración de las políticas requeridas para su implementación. Para ello se debe realizar un monitoreo regular del ecosistema para poder anticipar los problemas social-ecológicos, elaborar sistemas de alerta temprana de los impactos indeseados e implementar correcciones oportunas (Chapin et al., 2009; Marten, 2001).

2.7 Relación entre la diversidad y la estabilidad

Según la teoría del arrastre (del inglés, *The Entrainment Hypothesis*) los ecosistemas parecen estar estructurados de forma jerárquica en el tiempo y en el espacio. Los atributos espaciales de los objetos, como su tamaño o textura física entre otros, se estarían distribuyendo de forma discontinua formando un reducido número de categorías que pueden ser identificados y posteriormente estudiados. Sin embargo, puede que este modelo mental sea erróneo y más importante aún ¿Cuál es la contribución en las funciones del ecosistema y la organización del ecosistema? Al parecer esta teoría debe ser refinada (Holling, 1992).

En los manuales de ecología usualmente se menciona la existencia de una relación directa entre la diversidad y la estabilidad en un ecosistema; concepción que aparentemente carecería de un sustento empírico y teórico. Se ha propuesto que la diversidad y la estabilidad son más bien propiedades periféricas del ecosistema, y que estarían relacionadas con una propiedad más fundamental. Además de ello, aún se discute una definición de estabilidad de un ecosistema, por lo general se suele basar en un concepto ligado a la definición de resiliencia física, es decir, la capacidad del sistema para retornar a un punto después de una perturbación. Usualmente no se incluye conceptos como transformabilidad u homeorhesis. Una definición más apropiada de estabilidad queda como tarea pendiente en la teoría ecológica, así como formas de medir la diversidad (Margalef, 1982; Orians,

1980).

Una forma habitual de medir las perturbaciones ha sido el uso extensivo de los índices de diversidad como el criterio angular de las discusiones y conclusiones en los estudios de perturbaciones ambientales. Sin embargo, se puede llegar a estudiar dichos impactos a través del estudio de la variación estructural constituyente de un ecosistema y este sea la forma más simple y efectiva de estudiar alteraciones en el ecosistema (Margalef, 1982).

Se ha planteado que puede existir en una comunidad un orden simple que puede estar ocultado ante la aparente complejidad de la naturaleza y de la diversidad biológica. En varios estudios se puede tener la conjetura de que en una comunidad determinada y para algunas escalas existen patrones en la distribución espacial de las especies y en la estructura de la comunidad que estarían asociadas con la estructura de la vegetación y la fisonomía (MacArthur, Willson, Rotenberry y Wien, citados por Holling 1992; Whittaker, citado por Holling 1992).

2.8 Espacio geográfico en ecología

2.8.1 La “naturaleza” del ambiente: Biotopo, asociaciones, biocenosis y formaciones

El biotopo es el lugar físico en un espacio geográfico con determinadas condiciones ambientales donde reside y desarrolla una comunidad. Se consideran como factores, de importancia ecológica, del ambiente: el clima, el relieve y el agua (Küchler, 1988; Margalef, 1982).

El clima se basa en el histórico de los registros de temperatura, precipitación, viento, humedad atmosférica, entre otros. Se ha propuesta una división, en microclima (de escala local y cercana al suelo) y microclima (de escala regional). El seguimiento de los cambios estacionales es requisito para comprender la naturaleza del paisaje, por ejemplo, en un clima uniforme y de condiciones favorables durante todo el año, originan una vegetación homogénea y monótona. El relieve afecta el clima, el suelo y, en consecuencia, la vegetación; al variar la altitud, pendiente y exposición solar. Se debe tomar en cuenta que en la vegetación esta afectación puede ser abrupta a una distancia corta. El agua como limitante en la vegetación, ingresando al sistema por precipitación, humedad atmosférica, nieve, etc. y su salida como evapotranspiración. Así como otras consideraciones a tomar en cuenta es el déficit de saturación, retención del suelo, profundidad del nivel freático, efecto de lixiviación entre otros. Es estudio del biotopo se debe realizar en su conjunto

debido a las interacciones intrínsecas entre ellos (Küchler, 1988; Margalef, 1982).

Por razones de conveniencia práctica, y no exentas de arbitrariedad, se ha establecido dos tipos de unidades: asociaciones y biocenosis. Sin embargo, una vez definidas se debe tener un sustento estadístico para las relaciones y conclusiones de los estudios. Las asociaciones representan una unidad operacional, resultan de las técnicas de muestreo y corresponden a la descripción de un ecosistema que ha sido segmentado previamente en una escala determinada. Cada asociación es uniforme, con una muestra puede ser representada y se puede definir por sus valores medios (Margalef, 1982).

La biocenosis implica una mayor reflexión y un estudio más detallado, se puede considerar que está formada por un complejo de asociaciones. Un tipo de biocenosis se propone para una comunidad semejante, donde al alterarse un factor se alteran los demás. Para comprender la estructura del ecosistema se debe aplicar, en un marco de muestreo estratificado, diferentes procedimientos de muestreo. Se debe tomar en cuenta la escala de estudio (Margalef, 1982).

La fitocenosis es la comunidad vegetal de la biocenosis, y es la expresión integrada del biotopo. En unas condiciones ecológicas similares la fisionomía vegetal es muy similar. Sin embargo, no se debe llegar a la conclusión de considerar a la fisionomía, en sí mismo, como un indicador adecuado para las condiciones ecológicas de una zona. El estudio de los parches vegetales en el tiempo puede revelar fenómenos imperceptibles en un estudio puntual, es decir, se puede llegar a estudiar propiedades emergentes a través de los cambios en la vegetación. En las evaluaciones es recomendable recolectar datos y muestras relativas a la vegetación real y hacer una representación simbólica de la vegetación potencial hipotética (Küchler, 1988; Margalef, 1982).

Las formaciones vegetales se pueden definir como un conjunto de varios tipos de asociaciones con una fisionomía común o similar, y puede tener una composición florística diferente. Es una clasificación según la percepción y criterios del mapeador; suele ser poco cuantificable e incluso subjetivo. Se puede aplicar este concepto a una escala local, pero es impráctico a un nivel muy detallado, a escala de un país con una vegetación muy heterogénea o a escala regional (Margalef, 1982).

2.8.2 Heterogeneidad espacial

Se define como la complejidad y variabilidad de una propiedad del ecosistema en el espacio, como su dinámica, estructura, clases de suelo, disponibilidad de nutrientes, redes

tróficas, condiciones meteorológicas y climáticas; disponibilidad del agua, topografía, biomasa vegetal, distribución de especies animales, actividades antrópicas, etc. Es dependiente de la escala por lo cual, se puede observar un patrón en una escala de estudio determinado, y está variará a una escala diferente (Farina, 2006).

2.8.3 Fronteras

En la naturaleza suele ser difícil marcar fronteras o límites entre formaciones vegetales, si no hay una diferencia clara entre ambas o por poseen una amplia zona de transición o por que esta sea difusa. Se puede llegar a la conclusión de que parecería en vano la definición de límites. Sin embargo, parte del estudio de la vegetación implica cierto grado de generalización, es decir una ignorancia selectiva, para resaltar los objetos de interés de otros elementos secundarios y para definir estratos. Para esta labor, implica una considerable abstracción del investigador. Los criterios para establecer los límites deben considerarse como provisionales y perfectibles, sin que con ello socave la valides de lgos resultados del estudio (Küchler, 1988b; Margalef, 1982).

2.8.4 Mapa ecológico del paisaje y mapas de unidades terrestre

El mosaico del paisaje es una propiedad emergente de los ecosistemas que principalmente está siendo representado por el Mapa Ecológico, que destaca el tipo y estructura de la vegetación, y por el Mapa de Unidades Terrestres, que destaca la forma del terreno y la geología. Ambos mapas informan de aspectos edafológicos, uso de suelo, relieve, pendiente, tipos de rocas, cobertura vegetal, principalmente. Para su elaboración se recomienda hacer una recopilación de la información existente antes de la toma de datos en campo, lo cual facilitará las decisiones en las diferentes etapas de la elaboración del mapa. Un problema durante la elaboración del mapa es la identificación de discontinuidades de las comunidades presentes, por eso se recomienda estimar un gradiente máximo de distribución para zonas relativamente continuas para su delimitación. Los sistemas de información geográfica (SIG) son una herramienta capaz de facilitar el trabajo de elaboración del mapa, sintetizar la información y su posterior presentación (Küchler, 1988c; Margalef, 1982; Marten, 2001; Van der Zee & Huizing, 1988).

2.8.5 Muestreo de la vegetación

En el muestreo de la vegetación, siguiendo las recomendaciones de Mueller-Dombois y Ellenberg (1974) se deben cumplir los siguientes tres requisitos, independientemente del método usado en campo para la toma de muestras:

- La muestra debe ser lo suficientemente grande como para contener a todas o a la mayoría de especies relevantes que pertenecen a la comunidad de plantas.
- El hábitat debe ser uniforme dentro del área de la parcela, en lo posible, hasta donde se pueda determinar.
- La cubierta vegetal debe ser lo más homogénea posible. No debe mostrar grandes aberturas ni debe estar dominado por una especie en la mitad del área de muestreo y por una segunda especie en la otra mitad.

Por lo tanto, es necesario definir un tamaño óptimo de parcela con el afán de conseguir un nivel de precisión de los datos aceptable, reducir la variabilidad relativa entre las unidades del estudio y utilizar de forma más eficiente los recursos económicos, materiales, logísticos y humanos (Dinon et al., 2019 y LeClerg et al., 1962).

Además, considerando lo señalado por Holling (1992:447), que «el paisaje forma una jerarquía que contiene cortes en el tamaño de los objetos, las proximidades de los objetos y las texturas a escalas particulares» y que las rupturas o alteraciones en la geometría del paisaje se presentan debido a los procesos de estructuración, como la actividad antrópica, que ejerce su influencia sobre rangos de escala definidos; para definir la escala se tiene como criterio principal los procesos vegetales que determinan el crecimiento de la planta y su estructura.

De acuerdo a Küchler y Zonneveld (1988) los rangos usados para la descripción de la vegetación según el elemento de interés son:

- Una escala de 1: 20,000 a 1: 25,000 para sintetizar la vegetación natural de las áreas que pueden seleccionarse por su interés científico o su importancia económica.
- Una escala de aproximadamente 1: 10.000 para correlacionar las fitocenosis con las características de sus sitios. A esta escala, los mapas de vegetación pueden presentar tantos detalles florísticos que también pueden retratar las condiciones ecológicas de manera más efectiva.

La estructura temporal y arquitectónica de los “cuantos” del hábitat están, por lo general, determinadas por tres clases de procesos. Cada uno dominante en un rango diferente de escala: En la microescala, predominan los procesos vegetales; en la macroescala, predo-

minan los procesos geomorfológicos y en la mesoescla, predominan los procesos contingentes de distribución como los incendios, plagas, inundaciones, etc. Se debe incluir en el desarrollo de un programa, de evaluación o monitoreo, los procesos vegetales, la escala de dependencia, el análisis *cross-scala* y un análisis de las imágenes remotas para la identificación espacial de las discontinuidades y de regiones de invariancia de escalas. También se debe tomar en cuenta el tiempo de estudio de los procesos que pueden abarcar días, años o décadas. Para la cuantificación de la biomasa vegetal usando técnicas de sensoramiento remoto se suele usar una escala local para el estudio y una resolución espacial fina (Cáceres et al., 2015; Holling, 1992).

2.9 Teledetección

La teledetección es un procedimiento o técnica de adquisición de información sin tener contacto directo con ella. Sin embargo, de un modo más restringido, y en el ámbito de las ciencias naturales, la teledetección es entendida como una técnica que tiene por objeto la captura, tratamiento y análisis de imágenes digitales tomadas desde satélites artificiales (Sobrino et al., 2000).

En la adquisición de las imágenes satelitales se debe tener en cuenta los coeficientes de calibración, sesgo y ganancia, de cada banda en la imagen. Estos coeficientes se encuentran consignados en la metadata de la imagen satelital (Lamolda Ordoñez, 2008).

Las imágenes satelitales se pueden usar para la identificación de regiones mediante técnicas de análisis jerárquico y fractal. La aplicación de esta tecnología puede ser básica para el desarrollo de un esquema de monitoreo para la evaluación de la vulnerabilidad de los ecosistemas ante los cambios ambientales (Holling, 1992).

2.9.1 Terminología en teledetección

- Energía radiante (Q) mide la capacidad de una onda electromagnética para realizar trabajo. Indica la energía radiada transportada por una onda en todas las direcciones. Se cuantifica en Julios (J) (Alonso, n.d.; Chuvieco, 1996; Ormeño Villajos, 2006).
- Densidad de energía radiante (W) indica la cantidad de energía radiada en todas las direcciones por unidad de volumen. Donde $W = dQ/dV$. Se cuantifica en Julios por metro cúbico (J/m^3) (Chuvieco, 1996; Ormeño Villajos, 2006).
- Flujo radiante (Φ) es la cantidad de energía radiante, en todas las direcciones, transferida de una superficie a otra por unidad de tiempo. Donde $\Phi = dQ/dt$. Se cuantifica en

Julios por segundo (J/s) o Vatios (W) (Alonso, n.d.; Chuvieco, 1996; Ormeño Villajos, 2006).

- Densidad de flujo radiante ($d\Phi/dA$) es el flujo radiante interceptado por la unidad de área de una superficie. Se mide en vatios por metro cuadrado (W/m^2). Se le denomina emitancia radiante (M) es el flujo radiante es de salida, y si es de entrada se denomina Irradiancia (E) (Ormeño Villajos, 2006).
- El ángulo sólido o ángulo cónico (Ω) se define como un ángulo tridimensional subtendido por una superficie esférica (A) dividido por el radio de la esfera al cuadrado (r^2). Se mide en Estereorradianes (sr) (Alonso, n.d.; Ormeño Villajos, 2006).
- Intensidad radiante (I) es el flujo de energía radiante procedente de una fuente puntual con una dirección determinada por unidad de sólido (Ω) y por una unidad de tiempo. Donde $I = d\Phi/d\Omega$. Se cuantifica en vatios por estereorradián (W/sr o $J/s.sr$) (Alonso, n.d.; Chuvieco, 1996; Ormeño Villajos, 2006).
- La Emitancia o excitancia radiante (M) es la cantidad de energía radiante emitida, en todas las direcciones, desde una superficie emisora por unidad de área y por unidad de tiempo. Donde $M = \Phi/A = Q/t.A$. Se cuantifica en vatios por metro cuadrado ($Js^{-1}m^{-2}$ o Wm^{-2}) (Alonso, n.d.; Chuvieco, 1996).
- Emitancia espectral (M_λ) es la emitancia en una longitud de onda determinada del espectro electromagnético (Alonso, n.d.).
- Emisividad (ϵ) es la relación entre la emitancia de una superficie y la emitancia de un emisor perfecto, denominado cuerpo negro, a la misma temperatura (Chuvieco, 1996).
- Emisividad espectral (ϵ_λ) o emisividad de los cuerpos reales, es la relación entre emitancia de un cuerpo real y un cuerpo negro, a la misma temperatura. También es conocido como radiador selectivo. Es lo que caracteriza a los cuerpos reales (Ormeño Villajos, 2006).
- La Irradiancia (E) es la cantidad de energía radiante incidente, en todas las direcciones, en una superficie receptora por unidad de área proveniente de un cuerpo que lo ha emitido. Se cuantifica en vatios por metro cuadrado (W/m^2) (Alonso, n.d.; Chuvieco, 1996).
- Irradiancia espectral (E_λ) es la irradiancia en una longitud de onda determinada del espectro electromagnético (Alonso, n.d.).
- Radiancia (L) es el flujo de energía radiante que abandona, siguiendo un ángulo sólido de medida, una unidad de área superficial en una dirección particular. Donde

$L=(d\Phi/dA).\Omega.\cos\theta$, siendo θ es el ángulo formado por la dirección del flujo radiante y el vector perpendicular a la superficie receptora. Se cuantifica en vatios por metro cuadrado y estereorradián ($W/m^2.sr$). Es importante en la teledetección porque es la magnitud que detecta los sensores (Alonso, n.d.; Chuvieco, 1996; Ormeño Villajos, 2006).

- Radiancia espectral (L_λ) es la radiancia en una longitud de onda determinada del espectro electromagnético. Esta medida se aproxima a la observación remota (Alonso, n.d.; Chuvieco, 1996).
- Reflectividad (ρ) es la parte de la irradiancia que refleja la superficie receptora. Se define como el cociente entre el flujo radiante reflejado y el flujo radiante incidente. Es adimensional. Cada superficie y cada cuerpo tiene una reflectividad característica. Existen dos tipos de reflectancia: la reflectividad hemisférica y la reflectividad direccional. La reflectividad lambertiana es independiente al ángulo de observación (Alonso, n.d.; Chuvieco, 2010; Ormeño Villajos, 2006).
- Absortividad (α) es la parte de la irradiancia que absorbe la superficie receptora. Se define como la relación entre el flujo radiante absorbido por una superficie y el flujo radiante incidente. Es adimensional (Alonso, n.d.; Chuvieco, 1996).
- Transmisividad (τ) es la parte de la irradiancia que transmite la superficie receptora. Se define como el cociente entre el flujo radiante transmitido por una superficie y el flujo radiante incidente. Es adimensional. Para un cuerpo opaco será nula (Alonso, n.d.; Chuvieco, 1996; Lamolda Ordoñez, 2008).
- Albedo (α) se define como fracción de la radiación incidente, o irradiancia, reflejada sobre la superficie incidente en todas las direcciones. Depende del ángulo de incidencia, color y naturaleza de la cobertura la superficie. Si al aumentar el ángulo de incidencia disminuirá el albedo. En el supuesto de usar una superficie lambertiana, el albedo tendrá el mismo valor que la reflectividad (García Villanueva, 1994; Rodríguez Pérez et al., 2015).
- Nivel digital (ND) es el valor numérico entero de cada pixel, cuantifica a la radiancia recibida, proveniente de la superficie, por el sensor y está en función con el nivel de excitación, puntual espacial y temporalmente. Existe un error instrumental, la relación entre la energía recibida y el ND es: $L = aDN + b$. Donde L es la radiancia, a y b constantes propias del diseño del sensor, además a está relacionada con la resolución radiométrica (Rodríguez Pérez et al., 2015; Tristan et al., 2005).

2.9.2 Fundamentos de la teledetección

a. Espectro electromagnético

Los valores de longitud de onda se presentan en una sucesión continua. Para facilitar su estudio se establece una serie de bandas espectrales en base a un comportamiento similar de la radiación electromagnética, a ello se le denomina espectro electromagnético. Se organiza dependiendo de la longitud de onda, desde las cortas (rayos gamma, rayos x, etc) hasta los largos (telecomunicaciones). Las unidades de medición usadas son los gigahercios (GHz)

(Chuvieco, 2010).

Las bandas del espectro electromagnético de interés (Figura 2) se detallan a continuación: Espectro visible (0,4 a 0,7 μm), Infrarrojo de onda corto (SWIR) (1,2 a 2,5 μm), Infrarrojo medio (IRM) (2,5 a 8 μm), Infrarrojo próximo (0,7 a 1,3 μm), Infrarrojo lejano o térmico (8 a 14 μm) y Microondas (a partir de 1 mm) (Chuvieco, 2010).

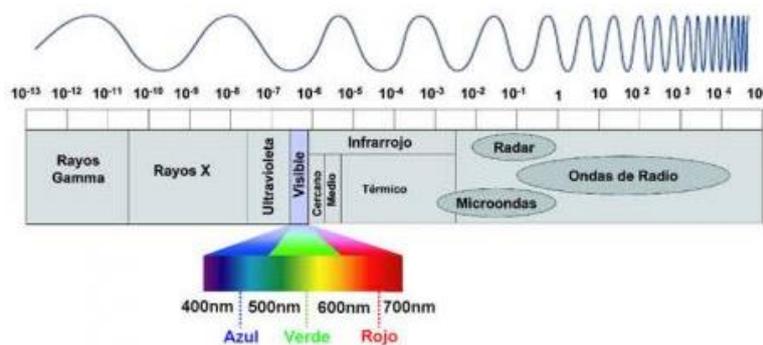


Figura 2. Espectro electromagnético. Nota: longitud de onda (λ) en metros.

FUENTE: Tomado de El espectrómetro (en línea) s. f. Web: <https://elespectrofotometro.com/wp-content/uploads/2017/01/espectro-electromagnetico-e1484162122522.jpg>

b. Principios físicos de la teledetección

Un sistema de teledetección está conformado por tres elementos: el sensor, objeto observado y flujo de energía. Este último es lo que permite la relación de los dos primeros. En los sensores ópticos usan la reflexión de la luz de los objetos para obtener la información. Siendo el flujo reflejado lo registrado por el sensor y está en función del tipo de cobertura de la superficie. Es, además, considerado como una forma de radiación electromagnética este flujo de energía (Chuvieco, 2010).

La teledetección se base en las propiedades de la luz según la teoría ondulatoria. Según esta teoría, la energía electromagnética es transmitida siguiendo un modelo armónico y

continuo, a la velocidad de la luz, y con los campos eléctrico y magnético ortogonales entre sí. De forma simplificada de la onda electromagnética se suele describir su comportamiento usando dos elementos: longitud de onda (λ), distancia entre dos picos sucesivos de una onda o espacio recorrido para cada ciclo, y la frecuencia (f), número de ciclos por unidad de tiempo para un punto fijo. La longitud de onda se relaciona con la frecuencia según la relación $c = \lambda \cdot f$. Con lo cual se puede describir cualquier tipo de energía radiante a partir de su frecuencia o longitud de onda (Chuvieco, 2010; Rodríguez Pérez et al., 2015).

El proceso de formación de una imagen inicia cuando un rayo incide en un objeto. Los objetos oscilan a una frecuencia determinada y absorben la energía, correspondiente a dicha frecuencia, del rayo incidente. Reflejando la energía de otras frecuencias. El sensor está constituido por materiales semiconductores, que están diseñados para la recepción de la energía reflejada por el objeto en las bandas espectrales de funcionamiento. Según la teoría cuántica, la energía transportada por el fotón, paquetes de energía, está en función de su frecuencia $Q = h \cdot f$ o $Q = h \cdot (c/\lambda)$, donde h es la constante de Planck ($6,6 \times 10^{-34}$ J.s). Según esta fórmula se explica la dificultad de detectar longitudes de ondas largas por su bajo nivel de energía (Chuvieco, 2010; Rodríguez Pérez et al., 2015).

El flujo de fotones debe cumplir dos condiciones: la suficiente energía, dependiendo de su longitud de onda, y un suficiente número de fotones, determinado por el flujo radiante y por el tiempo, para poder ser detectado por el sensor. Para cumplir la primera condición, el fotón debe ser lo suficientemente energético para excitar una oscilación en los electrones del sensor, pero no debe superar la energía necesaria para un cambio de energía, no se absorbe una fracción de fotón, de otro modo no será detectado. En cuanto a la segunda, según la teoría cuántica, depende de la probabilidad de un fotón es absorbido depende de su frecuencia, y por su cercanía a la energía de transición en el material del sensor, y también de la densidad de electrones en el sensor. También se debe tomar en cuenta la intensidad radiante de la fuente y el tiempo de integración del detector (Rodríguez Pérez et al., 2015).

La contabilización de la energía se hace en términos de Joules (J) o flujo radiante. Se debe tener en cuenta el ruido de la atmosfera, como dispersa y absorbe parte de la señal original, al estar interpuesto entre el objeto y el sensor (Chuvieco, 2010; Rodríguez Pérez et al., 2015).

c. Interacción atmosfera con la radiación electromagnética

Los procesos de interacción atmosférica introducen distorsiones y modificaciones en la radiación original propagada entre la superficie y el sensor atenuando la señal recibida, pudiendo incluso comprometer la fiabilidad de los datos. Son causadas por las partículas y moléculas atmosféricas (gases, aerosoles, gotas de agua, etc.) siendo el CO₂, O₃ y vapor de agua los principales responsables, causando una interacción con radiación electromagnética, en especial con las longitudes de onda corta. El efecto global es el producto de los tres fenómenos en la interacción de la radiación y las partículas: reflexión en la superficie; paso interno por la partícula, pudiendo haber reflexiones internas o no; y refracción en los bordes. Existen tres efectos: dispersión, absorción y emisión. Por ejemplo, la neblina afecta de forma uniforme las bandas del espectro visible, los gases atmosféricos y aerosoles absorben y dispersan la luz directa y reflejada por la superficie (Alonso, n.d.; Alzate, n.d.; Chuvieco, 1996; Ormeño Villajos, 2006).

Los constituyentes atmosféricos como el dióxido de carbono, absorbe la radiación en las longitudes de onda de 4,3 μm y 15 μm , presentando una concentración uniforme en la baja estratosfera, es decir, hasta los 100 km de altitud. El vapor de agua es importante para el intercambio energético hasta los 15 km de altitud, además, absorbe en diferentes bandas con longitudes de onda entre los 0,7 μm y 8 μm , menor entre 0,6 y 2 μm . El oxígeno atómico (O₂) absorbe la radiación ultravioleta inferior de 0,1 μm , partes del infrarrojo térmico y microondas. Las nubes son de tamaño y altura variable, se forman en la troposfera constituido por agua líquida y sólida con un radio entre 1 y 100 μm (Chuvieco, 1996; Ormeño Villajos, 2006).

Absorción atmosférica por los constituyentes atmosféricos (ver Figura 3) le brinda las características de un filtro selectivo en diferentes longitudes de onda, su efecto de distorsión puede imposibilitar, en algunos casos, la observación por teledetección. La absorción reduce la cantidad de energía de la radiación electromagnética en una determinada longitud de onda (Alonso, n.d.; Chuvieco, 1996). Una forma de eliminar esta dificultad que puede representar la dispersión, es situar las bandas de observación en zonas con una alta transmisividad para su corrección (Chuvieco, 1996).

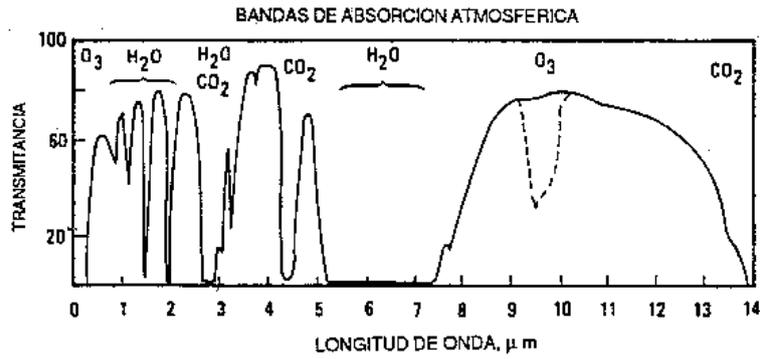


Figura 3. Bandas de absorción atmosférica.
FUENTE: Tomado de Butler et al. 1990.

La dispersión atmosférica redirecciona y redistribuye la energía de la radiación electromagnética al interactuar con los constituyentes atmosféricos, y está en función de la longitud de onda (ver Figura 4) (Alonso, n.d.; Chuvieco, 1996).

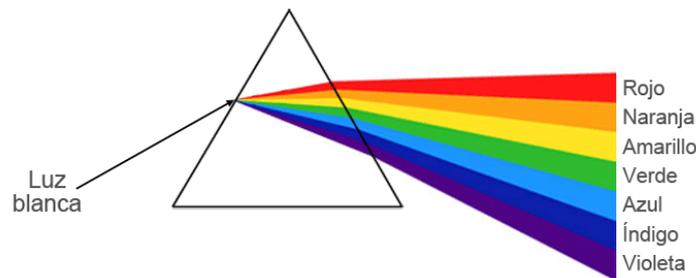


Figura 4. Descomposición de la luz a través de un prisma, un ejemplo de dispersión.
FUENTE: Tomado de CYMPER 2017.

d. Firma espectral

La firma espectral, o comportamiento espectral, es una medida cuantitativa de las propiedades espectrales, en función de su longitud de onda característico, de una superficie con lo que se constituye un perfil espectral específico. La superficie terrestre refleja una determinada radiación espectral hacia el sensor. Esta depende de varios factores, como la propiedad reflectiva de la superficie, rugosidad de la superficie, fotopigmentos, variación de la irradiancia solar, condiciones de iluminación, condiciones atmosféricas, los parámetros técnicos del sensor y para un momento determinado. El registro se hace en una o varias bandas espectrales. En la Figura 5 se presentan algunos ejemplos. Con este concepto es posible identificar las superficies y objetos de interés (Alonso s. f., CNICE 2006, Ormeño Villajos 2006, Rodríguez Pérez et al. 2015).

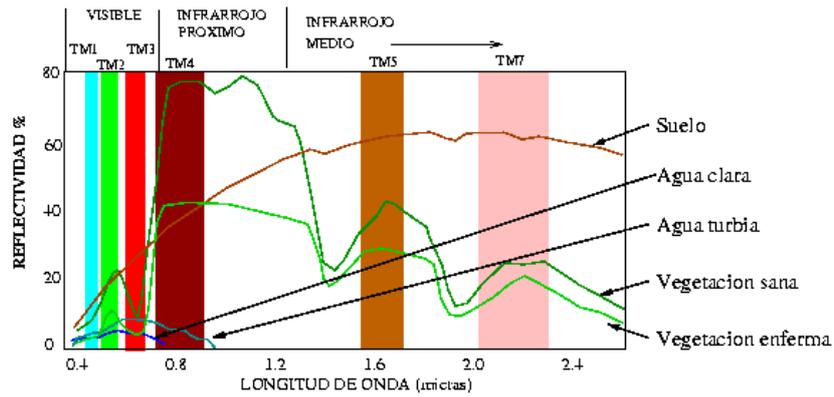


Figura 5. Ejemplos del comportamiento espectral de diferentes elementos.
FUENTE: Tomado de Universidad de Murcia (UM) 2006.

Según CNICE (2006) la radiación electromagnética, proveniente del sol, es transformada por los elementos geográficos como la vegetación, el suelo, los ríos, construcciones, cultivos o elementos geológicos en varios canales. Las diferentes respuestas de las coberturas en la superficie permiten su estudio, y son registrados en términos radiación reflejada, absorbancia y transmitida, y están relacionadas según la siguiente fórmula:

$$\% \text{ reflejada } (\rho) + \% \text{ absorbida } (\alpha) + \% \text{ transmitida } (\tau) = 100\%$$

La transmitancia, reflectancia y la absorbancia (ver Figura 6) son unidades adimensionales y la suma de sus valores en una superficie dada es igual a la unidad, con propiedad se pueden diferenciar los diferentes objetos o superficies en una imagen satelital, ya que un para determinado objeto tiene una determinada respuesta de estos parámetros (Alonso, n.d.; Chuvieco, 1996; Ormeño Villajos, 2006).

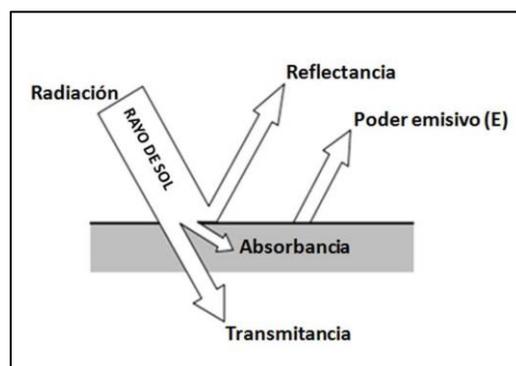


Figura 6. Transmitancia, reflectancia y absorbancia.
FUENTE: Tomado de Lupus Madrid 2016.

Firma espectral del agua: Por las propiedades espectrales del agua hacen que sea muy absorbente en el infrarrojo cercano, en torno a 1 μm de longitud de onda, teniendo como consecuencia la representación en “negro” en las imágenes tomadas en torno a esa banda.

Caso contrario ocurre en una longitud de onda de 489 nm, cuando presenta la mínima absorción, es cuando la luz penetra a la mayor profundidad posible. La reflectancia presenta un pico en el color verde y disminuye hacia el infrarrojo. Es esta la propiedad con la cual se puede distinguir las masas de agua con la tierra. Hay que adicionar a lo anterior la presencia de partículas en suspensión, con lo cual se observará una mayor turbidez, y la presencia de materia orgánica y fotopigmentos, responsables del color amarillo, y dependerá de su concentración presentando una mayor o menor intensidad de color (CNICE 2006, Rodríguez Pérez et al. 2015).

Firma espectral de la tierra o suelo: El rasgo característico más importante es su transmitancia nula, con lo cual toda la energía recibida es reflejada o absorbida. En todas las bandas la reflectividad es baja, aumentando hacia el infrarrojo. Los factores que más influyen son el contenido de agua, el tamaño de los granos, la textura, materia orgánica y minerales presentes (UM 2006, Rodríguez Pérez et al. 2015). Por las características físicas del suelo solo se puede observar la capa superficial con los sensores ópticos. El factor más importante es el contenido de agua, o humedad, disminuyendo la reflectividad al aumentar la concentración del agua, y es absorbido en las longitudes de onda de 1,45 μm , 1,9 μm y 2,7 μm . Si el agua forma costras en la superficie, disminuirá la reflectividad. Otro factor es la textura se observa mejor en el visible e infrarrojo cercano, al aumentar el tamaño de las partículas del suelo, o permeabilidad, aumenta la reflectividad, por ejemplo, los suelos arenosos presentan mayor reflectividad que los suelos arcillosos. El contenido de la materia orgánica al aumentar su contenido y menor sea el grado de descomposición, será un suelo más oscuro y menor la reflectividad. La presencia de óxidos de hierro incrementará la reflectividad en el rojo (UM 2006, Rodríguez Pérez et al. 2015).

Firma espectral de la vegetación: Para la descripción de la firma espectral de la vegetación se toma la respuesta espectral de las estructuras de la vegetación, las hojas, tallos, y el contenido de humedad. Los pigmentos de la vegetación absorben la mayor parte de la luz (entre 600 y 700 nm), teniendo como pico el rojo, y de alta reflexión en el infrarrojo cercano (entre 760 y 1500 nm), siendo esta la característica que lo distingue de otras cubiertas. Otro factor es el estado de la vegetación, los valores bajos de reflectancia en el infrarrojo cercano pueden deberse a una vegetación enferma o de una falta de humedad. Por regla general, al aumentar la densidad de la vegetación disminuye la respuesta en el rojo y aumenta en el infrarrojo cercano (Chuvienco, 2010; Ormeño Villajos, 2006; Rodríguez Pérez et al., 2015).

Según Baret y Andrieu (1994) y las propiedades de reflectividad de la vegetación dependen de tres variables:

1. Estructura de la cubierta vegetal sea por la orientación de las hojas, su distribución espacial y su tamaño.
2. Propiedades ópticas de los elementos reflectantes (tallos, hojas, flores y frutos).
3. Geometría de la observación, determinada por la orientación relativa entre el sol, la superficie y la posición del sensor.

En la Figura 7 y Figura 8 se presentan los valores de reflectancia según el tipo de componente vegetal. La estructura más relevante son las hojas, al ser el componente más extenso. Los pigmentos en las hojas son las responsables de la absorción de la luz, mayor parte del visible, y la reflexión en el infrarrojo cercano, será más intenso cuantas más superficies internas separen el tejido externo y el contenido celular (Rodríguez Pérez et al., 2015).

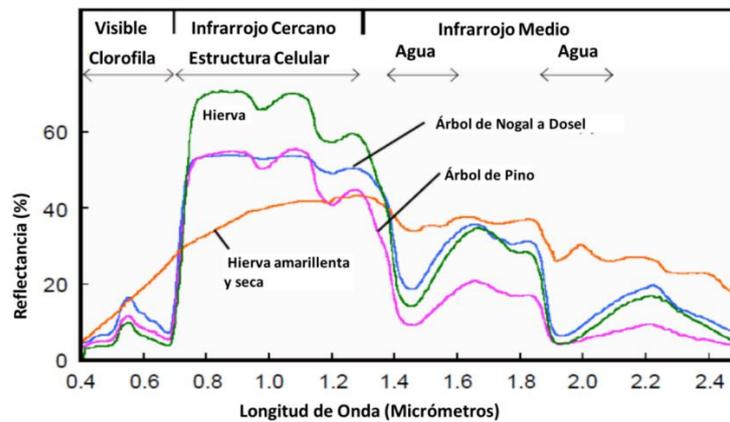


Figura 7. Firmas espectrales de algunas especies vegetales.
FUENTE: Tomado de Galindo Mendoza y Casiano Domínguez 2014.

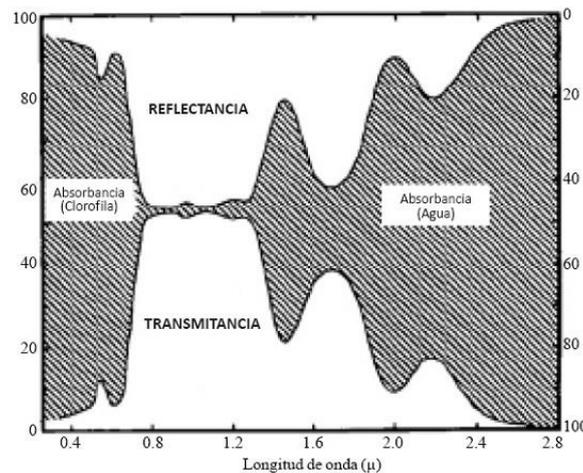


Figura 8. Espectro de reflectancia, transmitancia y absorbancia de las plantas.

Nota: En valores porcentuales.
FUENTE: Tomado de Aguilar 2015.

2.9.3 Sistemas satélites de teledetección

a. Resolución de un sistema sensor

Es la capacidad de un sensor de registrar y discriminar la información recibida, condicionado por las limitaciones técnicas. Su propósito práctico es el poder distinguir las variaciones energéticas detectadas por el sensor en un momento determinado. Se debe entender este concepto como la combinación de los diferentes componentes del sensor en su conjunto para obtener un resultado. Las resoluciones de un sistema sensor son: Resolución espacial, resolución espectral, resolución radiométrica, resolución angular y resolución temporal (Chuvieco, 1996).

La resolución espacial es la capacidad de distinguir el objeto más pequeño en una imagen de otro objeto. En los sistemas de un sensor óptico-electrónico, define el campo de visión instantáneo como la sección angular de observación, medida en radianes (Chuvieco, 1996; Pérez y Muñoz, 2006). El pixel se define como la mínima unidad de información en una imagen. Por fines prácticos se prefiere definir al pixel como la distancia en el terreno correspondiente al ángulo de observación, considerando los factores de la velocidad de exploración y altura orbital. El objeto solo es identificable en la imagen si supera como mínimo el tamaño del pixel (Chuvieco, 1996). La resolución espacial define el nivel de detalle de los objetos de una imagen y la fiabilidad de la información de la imagen con el terreno de estudio. Así como de la clasificación visual de las coberturas. La resolución espacial está relacionada con la escala y los objetivos del proyecto (Chuvieco, 1996; Pérez & Muñoz, 2006).

La resolución espectral indica el número de bandas y el rango de las longitudes de onda de cada banda espectral en el espectro electromagnético que puede discriminar el sensor. Con esta característica el sensor es capaz de registrar la firma espectral de un objeto de forma simultánea en distintas bandas (Chuvieco, 1996).

La resolución radiométrica se define como la capacidad del sensor para identificar los niveles, intensidades o variaciones en la radiancia espectral recibida, es decir, se puede decir que indica el grado de sensibilidad del sensor para detectar cambios en la radiancia o, en otras palabras, la menor cantidad de energía radiante que puede diferenciar. Para codificar y almacenar la energía electromagnética recibida por el sensor debe convertirse

en nivel digital, es decir, en valores binarios. También se puede definir la resolución radiométrica como el número de bits reservados para cada pixel para almacenar los valores de reflectancia (Chuvieco, 1996; Pérez & Muñoz, 2006; Rodríguez et al., 2015).

La resolución angular es la capacidad del sensor para la captura de imágenes desde diferentes ángulos oblicuos de una misma zona. Esta resolución implica dejar de asumir que las cubiertas tienen una reflectividad lambertiana, es decir, no la señal que recibe el sensor es dependiente del ángulo de observación. Permite reducir el tiempo para el recubrimiento de un mismo punto terrestre y describir efectos de reflectividad bidireccional. Además, permite la formación de imágenes estereoscópicas, con las cuales se puede hacer una modelización del relieve del terreno (Chuvieco, 1996; Pérez & Muñoz, 2006).

La resolución temporal indica la frecuencia con la cual el satélite adquiere una imagen del mismo sector de la superficie terrestre. Está influenciado por la altura, tipo de órbita, velocidad, inclinación del satélite; y el ángulo de observación y ángulo de apertura del sistema sensor. Estos factores están fijados de acuerdo con los objetivos de la misión espacial. Es importante para estudio de evolución o series de tiempo (Chuvieco, 1996; Pérez & Muñoz, 2006).

Las relaciones entre los tipos de resolución de un sensor están estrechamente relacionadas a los fines del sensor remoto, debido a que, al aumentar un tipo de resolución, aumentará el volumen de datos que serán transmitidos y aumentará en tiempo y costos del procesamiento de las imágenes, por lo que las resoluciones de los sensores deben tener los niveles óptimos para el estudio del objeto de interés (Chuvieco, 1996).

Por lo general, se califica la calidad del sensor según el nivel de la resolución espacial, sin embargo, ese criterio es muy simplista, ya que las cualidades y ventajas que ofrecen los sensores son afines a los objetivos con los cuales fueron diseñados, en una combinación de los tipos de resolución específica para el objeto de estudio sin la necesidad de tener un fino detalle visual. Además, la resolución espacial no siempre significa una mejora en la exactitud de los resultados para una clasificación digital, debido a la posible confusión causada por la errónea interpretación del *software* de la reflectancia de las coberturas, solapándose con las coberturas vecinas (Chuvieco, 1996).

b. Calibración y correcciones de la imagen satelital

Según Chuvieco (2010) y Rodríguez Pérez et al. (2015) se plantea la necesidad de calibrar las imágenes adquiridas realizando tres tipos de correcciones (radiométrica, atmosférica

y topográfica) y una conversión de ND a parámetros físicos. El problema se plantea como complejo por los factores que pueden afectar la señal detectada por el sensor. Se recomienda realizar como primeros pasos se debe realizar una conversión de los Niveles digitales a radiancia en el tope de la atmósfera (TOA, *top of the atmosphere*), y de radiancia a reflectancia, para ello se han desarrollado una serie de fórmulas propuestos por diversos autores con el fin de realizar esta transformación, y están determinados por las características del sensor, condiciones atmosféricas, brillo del suelo y otros ruidos que pudieran existir, estos están incluidos en los *software* de procesamiento de imágenes que se seleccionaron. Una vez calculado la reflectancia, es necesario realizar la limpiar la imagen para su posterior procesamiento. En las siguientes secciones se detalla las correcciones.

Las correcciones geométricas son un conjunto de técnicas y procesos con el fin de corregir las distorsiones métricas sobre las imágenes adquiridas para tener una concordancia la posición de los píxeles originales con el sistema de referencia del proyecto. Estas transformaciones pueden realizarse con funciones numéricas, pudiéndose usar una corrección cartográfica o en base a otra imagen (Chuvieco, 2010; Lamolda Ordoñez, 2008; Ormeño Villajos, 2006).

Las correcciones radiométricas, según diversos autores, consignan diferentes procedimientos, basado en diferentes criterios, a este tipo de corrección, por lo cual se considera un término genérico. Se puede definir como el conjunto de técnicas que modifican los valores ND originales para hacerlos a una recepción ideal. Se incluye como problemas el mal funcionamiento del sensor, diferentes clases de ruidos radiométricos, brillo del suelo, pendiente del relieve, estimación de magnitudes físicas, etc. (Chuvieco, 2010).

Chuvieco (2010) plantea dos importantes correcciones de este tipo:

- Restauración de líneas o píxeles perdidos: En una visualización, la imagen presentaría una serie de líneas anómalas (negras o blancas), o una serie de píxeles aislados de aspecto muy contrastado con los vecinos.
- Corrección de bandeo de la imagen o *striping*: Se debe a una mala calibrado entre los detectores que forman el sensor; es decir, algún sensor codifique la radiancia que recibe en ND distintos a los demás.

La corrección atmosférica se aplica debido a que la radiación reflejada por la superficie es, principalmente, dispersada y absorbida por los constituyentes atmosféricos produciendo una serie de distorsiones, que es dependiente de la longitud de onda. Al eliminar

el efecto atmosférico, los ND presentaran una mejor correlación con la cobertura de la superficie. La dificultad para su corrección es la heterogeneidad de la composición de los constituyentes atmosféricos, siendo puntuales un momento y lugar determinado, y siendo complejos de predecir. Es un procedimiento indispensable si se desea establecer modelos relacionales ND-parámetros físicos, como la cuantificación de biomasa vegetal (Chuvieco, 2010; Ormeño Villajos, 2006).

Según Ormeño Villajos (2006) existen tres principales efectos atmosféricos:

1. En superficies uniformes: la radiancia atmosférica puede aumentar el brillo y tornarlo opaco por la absorción y dispersión atmosférica.
2. En superficies no uniformes: la dispersión atmosférica reduce la variación entre las coberturas claras con las oscuras, por una contaminación de la radiancia en los bordes.
3. Las nubes de menor tamaño al pixel aumentan el brillo aparente.

Según Alonso (s. f.), Alzate (s. f.), Chuvieco (2010) y Ormeño Villajos (2006) existen diferentes métodos para realizar la corrección atmosférica: Ecuación de Transferencia Radiativa, Uso de las ventanas atmosféricas, Método del histograma, Método de componentes principales, Método del objeto invariante y Método del objeto oscuro.

La corrección topográfica se aplica debido al efecto topográfico. Esto se debe al cambio del ángulo de la fuente de luz, la posición del sensor y el cambio de la orientación en la incidencia y reflexión en una superficie inclinada, variando la radiancia detectada por el sensor. Existen dos efectos topográficos: directos, diferencias en el brillo debido a los cambios en el terreno por pixel, e indirectos, debido a la distribución de reflectancia bidireccional. El efecto topográfico contribuye al ruido, siendo de especial cuidado en zonas montañosas, y debe corregirse antes del cálculo de los índices de vegetación (Holben & Justice, 1981; Matsushita et al., 2007).

2.9.4 Índices de vegetación

Los índices de vegetación (IV) se define como los cálculos aritméticos de los valores digitales, por lo general la reflectancia, de dos o más bandas sensibles a las características espectrales de la vegetación, usando como apoyo para su estimación los *softwares* a partir de las imágenes satélites, produciendo un valor que indica el vigor o cantidad de vegetación por pixel, y de fácil interpretación. Los índices de vegetación se han usado en diferentes estudios como las áreas de uso agrícola, semiurbano y silvestres, en el estudio del paisaje en escala local y regional, y de los biomas a nivel global, siendo importante su

aplicación en monitoreo ambiental, clasificación vegetal, relacionantes con parámetros biofísicos, como el índice del área foliar, absorción de la radiación fotosintéticamente activa (APAR), producción de biomasa y porcentaje de cobertura vegetal (Liu & Huete, 1995; Matsushita et al., 2007; Ormeño Villajos, 2006; Schmidt & Karnieli, 2001).

La mayoría de los índices de vegetación se basan en las respuestas espectrales de la vegetación en las bandas del rojo e infrarrojo y son dependientes de la reflectancia a nivel del suelo o en el tope de la atmosfera. Existen tres importantes variables que afectan los índices de vegetación son: 1) la reflectancia del suelo, 2) la densidad de la vegetación (LAI), 3) la arquitectura del dosel de la vegetación (ángulo de la hoja) (Ormeño Villajos, 2006; Rondeaux et al., 1996).

Para un mejor ajuste de los resultados de los IV, se debe tomar en cuenta los efectos atmosféricos, las condiciones climáticas, la topografía (pendiente, aspecto y altitud), la iluminación, áreas sombreadas, la calibración del sensor, la composición de la vegetación, el estado fenológico, el efecto del suelo, entre otros (Matsushita et al., 2007; G. Zhu et al., 2014).

a. Índices basados en la pendiente

Se basan en la combinación de bandas a través de operaciones aritméticas teniendo como principales bandas de entrada la banda rojo visible e infrarrojo del espectro electromagnético, estas bandas son las más extensamente usadas para el cálculo de estos índices (Alzate, n.d.; Pereda, 2013). Debido a que estos índices son susceptibles a la división por cero, se plantea como una solución de este problema la adición en la estructura de las fórmulas la normalización de los valores de reflectancia (Alzate, n.d.).

b. Índices de vegetación basados en la distancia

El principal objetivo de esta categoría de índices es suprimir o disminuir el ruido por efecto del suelo, principalmente en zonas de escasa vegetación y de amplia distribución, y donde en los valores de los pixeles contengan valores de vegetación y suelo. Siendo esta característica propia de las zonas áridas y semiáridas (Alzate, n.d.; Pereda, 2013).

2.10 Descripción de los sistemas satelitales y combinación de bandas

2.10.1 Sistemas satelitales LANDSAT 8, SENTINEL-2 y SPOT-6

a. Satélite LANDSAT 8

La misión LANDSAT tiene una historia de cuatro décadas en la adquisición de imágenes satelitales con aplicaciones relacionados a los campos de agricultura, geología, planificación territorial, mapeos e investigaciones. Las imágenes son de libre disponibilidad y sin costo. Es parte del Programa Nacional de Imágenes de Tierra (NLI) de USGS en convenio con la NASA. El satélite LANDSAT 8 fue lanzamiento el 11 de febrero del 2013 (U.S. Geological Survey (USGS), 2017a, 2017b). Sus características técnicas están consignadas en la metadata de la imagen (Lamolda Ordoñez, 2008; Ormeño Villajos, 2006) y según U.S. Geological Survey (USGS) (2017) estas son:

- Órbita sincrónica solar a una altitud de 705 km
- 233 ciclo de órbita; cubre todo el globo cada 16 días (a excepción de las latitudes polares más altas).
- Inclinado 98.2° (ligeramente retrógrado)
- Circula la Tierra cada 98,9 minutos
- Tiempo de cruce ecuatorial: 10:00 a.m. +/- 15 minutos
- Resolución espacial: 30 m (bandas 1-7 y 9), 15 m (banda 8) y 100 m (bandas 10 y 11) (ver Tabla 1).

Tabla 1: Descripción de las bandas espectrales del satélite LANDSAT 8

Sensor	Banda	Ancho (μm)	Resolución (m)	Objeto de mejor visualización
Sensor OLI (Operational Land Imager)	Banda 1 Aerosol Costero	0.43 – 0.45	30	Agua poco profunda y partículas finas de polvo
	Banda 2 Azul	0.45 – 0.51	30	Agua profunda y atmósfera
	Banda 3 Verde	0.53 – 0.59	30	Vegetación
	Banda 4 Roja	0.64 – 0.67	30	Zona Urbana, suelo y vegetación
	Banda 5 NIR	0.85 – 0.88	30	Costas y vegetación
	Banda 6 SWIR1	1.57 – 1.65	30	Penetración de las nubes, humedad del suelo y de la vegetación
	Banda 7 SWIR2	2.11 – 2.29	30	Penetración mejorada de las nubes, humedad del suelo y de la vegetación
	Banda 8 Pancromático	0.50 – 0.68	15	Imágenes en blanco y negro, con mejor resolución espacial
Sensor TIRS (Thermal Infrared Sensor)	Banda 9 Cirrus	1.36 – 1.38	30	Nubes de tipo cirro
	Banda 10 TIRS1	10.6 – 11.19	100	Representación térmica, humedad estimada del suelo
	Banda 11 TIRS2	11.5 – 12.51	100	Representación térmica mejorada, humedad estimada del suelo

Nota: Adaptado de U.S. Geological Survey (USGS) 2017, Learn ArcGIS 2018, Franzpc 2017

b. Misión SENTINEL-2

Está conformada por dos satélites con instrumentos de alta resolución. Su objetivo es el monitoreo terrestre, suelo, vegetación y zonas costeras; gestión de emergencias y cambio climático. Fue desarrollado por *Astrium GmbH* (Alemania) y *Astrium SAS* (Francia), de propiedad de la Agencia Espacial Europea (ESA, por sus siglas en inglés). Las imágenes son de libre disponibilidad y sin costo. El primer satélite SENTINEL-2 se lanzó en junio de 2015 (European Space Agency (ESA), n.d.-b). Sus características técnicas según European Space Agency (ESA) (2018) son:

- Satélites de órbita polar.
- Órbita sincrónica al sol a una altitud media de 786 km.
- Inclinación 98.62°.
- Fase de 180° entre ambos satélites.
- Cada satélite carga el Instrumento MultiEspectral (MSI) con 13 bandas espectrales (cuatro bandas a 10 m, seis bandas a 20 m y tres bandas a una resolución espacial de 60 m) para el satélite S2A (ver Tabla 2) y un campo de visión de 290 km.
- Instrumentos de calibración por iluminación solar.

- Revisión por el ecuador cada 5 días y de 2 a 3 días en latitudes medias.
- Límite de cobertura entre 56 ° sur y 84 ° norte.

Tabla 2: Descripción de las bandas espectrales de la Misión SENTINEL-2A

Banda	Longitud de onda central (nm)	Ancho de banda (nm)	Resolución espacial (m)
Banda 1 – Aerosol	443.9	27	60
Banda 2 – Azul	496.6	98	10
Banda 3 – Verde	560.0	45	10
Banda 4 – Rojo	664.5	38	10
Banda 5 – NIR	703.9	19	20
Banda 6 – NIR	740.2	18	20
Banda 7 – NIR	782.5	28	20
Banda 8 – NIR	835.1	145	10
Banda 8A – NIR	864.8	33	20
Banda 9 – Vapor de Agua	945.0	26	60
Banda 10 – Cirrus	1373.5	75	60
Banda 11 – SWIR	1613.7	143	20
Banda 12 – SWIR	2202.4	242	20

Nota: Recuperado de European Space Agency (ESA) 2018 y National Aeronautics and Space (NASA) 2015.

c. Satélite SPOT 6

Originalmente el programa fue lanzado por el CNES (Centro Nacional de Estudios espaciales) de Francia y posteriormente continuado por *Airbus Defence & Space*, su misión es el estudio de la superficie terrestre. Sus aplicaciones para el mapeo, monitoreo ambiental, modelado digital del terreno, vegetación, uso del suelo e impactos y emergencias por desastres naturales. Ambos satélites están es fase de 180°, a una órbita casi polar con una latitud de 694 km y una extensión visual de 60 km por 60 km. Poseen 5 bandas espectrales (ver Tabla 3), de alta resolución, con una revisita diaria. Por su diseño permite capturas en condiciones climáticas cambiantes (*Airbus Defence and Space*, 2013; *Centre national d'études spatiales (CNES)*, 2018).

Tabla 3: Descripción de las bandas espectrales de los satélites 6

Banda	Longitud de onda (nm)	Resolución espectral (m)	Objeto de mejor visualización
Banda 1 - Pancromático	455 - 745	1,5	Imágenes en blanco y negro, con mejor resolución espacial
Banda 2 - Azul	455 – 525	6	Agua profunda y atmósfera
Banda 3 - Verde	530 – 590	6	Vegetación
Banda 4 - Rojo	625 – 695	6	Zona Urbana, suelo y vegetación
Banda 5 - Infrarrojo cercano	760 - 890	6	Costas y vegetación

Nota: Adaptado de Airbus Defence and Space 2013

2.10.2 Combinación de bandas espectrales

Es una herramienta usada en el análisis descriptivo de las imágenes satelitales o fotografías aéreas permitiendo resaltar elementos específicos de interés usando como criterio su espectro de emisión, o firma espectral. Con ello se pueden interpretar diferentes elementos del paisaje como el uso de suelo, cuerpos de agua, vegetación, etc. (Gis&Beers, 2017).

Existen dos condiciones para el uso de las combinaciones de bandas: 1) se debe conocer el comportamiento de la reflexión del elemento de interés en el espectro electromagnético; y 2) conocer el rango de las longitudes de onda en las bandas con las que opera el satélite escogido para el estudio. Con ello se podrán escoger las bandas que más convengan para la aplicación de esta herramienta (Gis&Beers, 2017).

Las siguientes combinaciones de bandas son presentadas por Agua y SIG (2001), Franzpc (2017), Fernández-Coppel y Herrero Llorente (2001), Learn ArcGIS (2018) para los sistemas satelitales de LANDSAT 8 y SENTINEL 2B, se agregó los equivalentes para SPOT 7:

Color natural: LANDSAT 7 (3, 2, 1) LANDSAT 8 (4, 3, 2), SENTINEL 2B (4, 3, 2), SPOT6/7 (4,3,2). Se presenta el color de los objetos como lo percibe el ojo humano. La vegetación se resalta en tonalidades verdes. Tiene una mayor aplicación para estudios de los cuerpos de agua, para aguas profundas se simboliza de color azul oscuro y aguas de mediana y baja profundidad de color azul claro. Para las aguas turbias tienen una coloración verde amarillo y para el suelo desnudo colores de tonalidades amarillento y plateado.

Agricultura: LANDSAT 7 (5, 4, 1), LANDSAT 8 (6,5,2), SENTINEL 2B (11,8A,2). Los colores rojo-magenta simbolizan la vegetación vigorosa, característicos de los campos de cultivo. Los colores blancos son de escasa presencia de vegetación. Los colores verdes son de vegetación moderada.

Urbano: LANDSAT 7 (7, 5, 3), LANDSAT 8 (7, 6, 4), SENTINEL 2B (12, 11, 4). Las zonas urbanas y los cuerpos de agua están bien delimitados. Las zonas urbanas se presentan de colores blanco, gris, cian o púrpura; los cuerpos de agua en tonalidades de azul a negro; el hielo y nieve en color azul oscuro; la vegetación, dependiendo del estado fenológico, en tonalidades de verde claro a verde oscuro; los suelos de colores variados.

Color infrarrojo para vegetación: LANDSAT 7 (4, 3, 2), LANDSAT 8 (5,4,3), SENTINEL 2B (8,4,3), SPOT 6/7 (5,4,3). Usado para la identificación de zonas urbanas y la vegetación. Con el color rojo-magenta presenta una alta densidad de vegetación, propio de bosques o cultivos, En color rosa, la vegetación en un estado fenológico temprano o de menor densidad. El color blanco identifica a la nubosidad. Las tonalidades de azul oscuro identifican la presencia de cuerpos de agua. El gris y azul metálico resalta las zonas urbanas y suelos desnudos. El color marrón identifica bosques planos y vegetación arbustiva.

Análisis de vegetación: LANDSAT 7 (5, 4, 3), LANDSAT 8 (6,5,4), SENTINEL 2B (11,8A,4). Se resalta la presencia de la vegetación en color verde y el terreno se simboliza de tonalidades de marrón claro. Es útil para la delimitación de los parches vegetales.

Análisis de vegetación sana: LANDSAT 7 (4, 5, 1), LANDSAT 8 (5,6,2), SENTINEL 2B (8A,11,2). Permite la discriminación de la vegetación saludable y la enferma o atacada por plagas, tiene mayor aplicación para estudios agronómicos. Presenta tonalidades de verde la vegetación sana y en otras tonalidades se presentan el resto de la vegetación.

Natural con remoción atmosférica: LANDSAT 7 (7, 4, 2), LANDSAT 8 (7, 5, 3). Esta combinación de bandas presenta una aproximación del color natural, pero con una remoción de los aerosoles e influencia de la atmósfera, permitiendo disminuir el ruido y poder realizar una mejor observación de los objetos. Los pastos y praderas se representan en verde claro, las zonas de bosques en tonalidades de verde olivo a verde oscuro. Para los cuerpos de agua se simbolizan en tonalidades de azul oscuro, las zonas urbanas de color magenta y los suelos desnudos, dependiendo de la humedad, en tonalidades de rojo a rosado.

2.11 Fundamentos de los Sistemas de información geográfica

2.11.1 Definición

Según Heywood et al. (2006) las definiciones de los sistemas de información geográfica (SIG) consideran tres componentes principales: sistema informático (incluye hardware, software y procedimientos apropiados), datos espacialmente referenciados o datos geográficos y análisis de gestión y análisis de estos datos (incluyendo datos de ingreso y salida).

Según la definición propuesta Chrisman y Longley et al. citado por (Peña et al. 2008:497) «los SIG son un conjunto de programas y aplicaciones informáticas que permite la gestión de datos organizados (almacenamiento, análisis y representación) en base de datos referenciadas espacialmente». Según Olaya (2012:9) expande esa definición de los SIG, y lo concibe como «un sistema que integra tecnológico informática, personas e información geográfica, y cuya principal función es capturar, analizar, almacenar, editar y representar datos georreferenciados».

Según la definición del National Center for Geographic Information and Analysis (NCGIA) (1997) el sistema de información geográfico (SIG) es un sistema de hardware, software y procedimientos diseñados para realizar la captura, almacenamiento, análisis, modelización y presentación de datos espacialmente referenciados, para resolver problemas de planificación y gestión del territorio.

Según la definición propuesta por Cabrera Ortega y García Pérez (2015) es una técnica informática que permite trabajar con datos de diferente índole con una georreferencia definida, complementados con herramientas para la edición, almacenamiento, análisis, gestión y consulta de dichos datos. Permitiendo obtener resultados y conclusiones, descriptivos e inferenciales, para la modelización de un espacio de estudio, hacer predicciones y la toma de decisiones para la gestión del territorio.

2.11.2 Uso de los SIG en Ecología

El uso de los SIG aplicado a la ecología, se remonta a la década de los setenta del siglo XX, teniendo las primeras referencias en el estudio de poblacionales. Desde entonces ha ido evolucionando y expandiéndose a diferentes quehaceres de la ecología. Actualmente, es una herramienta indispensable para establecer relaciones entre los sistemas humanos, los sistemas naturales y el desarrollo de sistemas de gobernanza, siendo aplicado en la toma de sesiones (Peña et al., 2008).

En la actualidad, los sistemas de información geográfica se desarrollan en un espacio virtual. Los SIG tienen como principal objetivo la manipulación de los datos geográficos (elemento que está indicado por una coordenada geográfica). Para facilitar el análisis de la información se suele dividir la información usando el modelo geográfico que consiste en una colección de capas de datos, donde cada capa contiene un tipo de información específica, para una descripción más detallada de las variables de estudio (como variables climáticas, edáficas, cobertura vegetal, distribución, etc.), y combinar dicha capa con otra información (como actividades humanas, cambio climático, etc.) con el fin de tener una visión más integral de un área de interés (Gutierrez y Gould, citado por Peña et al. 2008; Peña et al. 2008).

La aplicación de los SIG en ecología, en especial en campo de la ecología espacial, resulta en varias ventajas, como la posibilidad de homogeneizar variables; graficar y presentar los resultados; y manejo de bases de datos. Se debe también cuando se aplica los SIG el marco de referencia (posición del observador y contexto), dado que la percepción de la naturaleza, o variable de estudio, y su organización es relativa a ella. Por ejemplo, un paisaje en cuanto más se aleje de una estructura aleatoria estará más organizada (Peña et al., 2008).

2.11.3 Elementos de los sistemas de información geográfica

Según Peña et al. (2008) y Olaya (2012) los elementos necesarios de los SIG son:

- Usuarios: Es requisito indispensable tener un personal con conocimientos de las tecnologías SIG. Con ello se evita un manejo erróneo de los datos y de los procesos de análisis espacial e incluso suplir algunas deficiencias de los otros componentes del SIG.
- Tecnología: Se divide en dos: hardware y software. El hardware es el elemento físico de los SIG, debe cumplir con los requerimientos específicos para el desarrollo de los proyectos. Es la plataforma de trabajo con los SIG. El software es la herramienta encargada de facilitar al usuario la manipulación de información geográfica. Sus componentes son: sistema de manejo de base de datos, interface gráfica; herramientas de operación, consulta, visualización y presentación de la información geográfica.
- Datos: Es el componente más importante y se debe asegurar su fiabilidad. Los datos ingresan al SIG, son procesados y posteriormente analizados para la resolución de los problemas que el investigador se ha planteado. Es requisito indispensable que los datos estén georreferenciados. Se debe integrar los datos de distinta procedencia, ordenarlos y manejarlos según su naturaleza y características propias.

- Procedimientos: Se debe planificar el tipo de dato requerido, las reglas de las actividades, el diseño de los modelos y prácticas operativas. Posterior a ello se debe analizar los resultados. Para esta etapa se debe recopilar información de diferentes fuentes y afín a la naturaleza de la ciencia que el investigador aplica.

2.11.4 Modelos de representación de los datos geográficos

Los sistemas de información geográfico se basan en «una serie de capas de información espacial en formato digital que representan diversas variables (estructuras raster), o capas que representan objetivos (estructura vectorial) a los que corresponden varias entradas en una base de datos enlazada» (Peña et al., 2008:499-500). Según Cabrera Ortega y García Pérez (2015), Longley et al. (2005), Olaya (2012), Wing y Bettinger (2008) los formatos usados en los SIG son:

- Datos Vectoriales: Se usan para representar elementos o entidades geográficos observables, su variabilidad y característica, por medio de entidades geométricas. Existen tres tipos de objetos: Puntos, Líneas y Polígonos, su uso depende de los fines, de la escala y nivel de detalle del estudio. El fichero *shapefile* (.shp) es el formato más extensamente usado para el almacenamiento, edición y presentación de los datos vectoriales.
- Datos *Raster*: Se usan para la representación de datos continuos. Es la forma en que se presenta las imágenes satelitales. Una zona de interés se divide en unidades mínimas rectangulares, llamadas celdas o pixel, en una matriz de forma sistematizada. El pixel representa una parte de la zona y guarda la información que la caracteriza (atributo); está georreferenciado y localizado en su posición relativa, fila y columna, en la imagen. Según las dimensiones del pixel, se califica la resolución espacial de la imagen. Los ficheros *.tiff*, *.jpg*, *.gif* y *.png* son los más usados para el almacenamiento de los datos *raster*, acompañado de un archivo que guarda la información general de la imagen.

2.11.5 Operaciones con un sistema de información geográfica

Las operaciones en los Sistemas de Información Geográficas (SIG) son una serie de funciones para la gestión de los datos e información geográfica. Estas operaciones son la entrada, o digitalización, de los datos georreferenciados o información geográfica. El almacenamiento y gestión de base de datos como la consulta de datos ingresados, recuperación o rectificación. El procesamiento y análisis de los datos como la creación de topologías, gráficas, superposición de datos o capas. La edición y confección de mapas es la

presentación, o salida, de la información geográfica, es el resultado de las operaciones en SIG y busca la visualización y representación de la información geográfica de forma clara, eficiente y con sentido lógico (Buzai et al., 2016; Cruz, 2009; Rodríguez & Olivella, 2010).

Según Olaya (2012), Peña et al. (2008) y Rodríguez & Olivella (2010) con el conjunto de operaciones, mencionado anteriormente, se puede desarrollar una serie de tareas:

- Organización de datos: Desde la adquisición de datos, su gestión, almacenamiento y posterior análisis. Se debe contar con formatos y un orden para la optimización del espacio de trabajo y del tiempo. Actualmente se puede almacenar la información en forma de geometría y atributos con formatos digitales permitiendo la fácil edición y reproducción de la presentación de los datos.
- Visualización: La representación visual añade una perspectiva más natural e intuitiva. Se requiere transferir datos complejos y a veces complejos a una representación de una imagen o mapa capaz de resumir la información. Además de la facilidad de seleccionar los niveles de información que se desee analizar y en acorde al contexto de estudio. Se puede representar los datos a través de mapas, reportes, gráficos, etc.
- Producción de mapas: Los SIG representan una ventaja en comparación de los sistemas de Diseño Asistido por Ordenador (CAD), en cuanto a la facilidad de elaboración y una mejor presentación de la información, teniendo la posibilidad de añadir elementos como leyendas distintas, flecha norte, escala, etc. Como trabaja con capas de información se puede elaborar nuevos mapas dependiendo de las necesidades del investigador. Se puede prestar confusión entre el sistema y otro, usualmente los CAD está más ligado una mayor precisión requerida en la ingeniería y son una fuente de datos para los SIG.
- Consulta espacial: Con los SIG se puede realizar consultas sobre las propiedades de un objeto. Tener más detalles sobre su geometría y atributos y poder elaborar reportes en base a ellos.
- Análisis espacial: Con el fin de evidenciar los patrones o relaciones ocultos al investigar se realizan un conjunto de técnicas en las capas (niveles de información). Es necesario para ello un operador con los conocimientos requeridos para el análisis y un equipo de computadora capaz de realizar las operaciones requeridas.
- Previsión: Para tener un conocimiento general del área de estudio y para la previsión de posibles escenarios futuros; los SIG son las herramientas para poder evaluar los

eventos, modificar parámetros y ajustar a las condiciones ambientales con el fin de tomar medidas de prevención. Los SIG pueden presentar la información geográfica como elaborar mapas de riesgo y contribuir en la toma de decisiones.

- Creación de modelos: Se puede desarrollar y aplicar modelos digitales que tratan de representar el mundo real. Con información geográfica se puede hacer la validación de escenarios hipotéticos, así como representar mediante una serie de tiempo la trayectoria de la evolución del área de estudio.

2.11.6 Manejo de datos espaciales

El análisis de datos espaciales son un conjunto de operaciones de los SIG. En el análisis mantiene las características espaciales con la cual le sirven al investigar explorar e interpretar la información geográfica para la toma de decisiones y la solución de problemas. Existe una amplia variedad de métodos disponibles para obtener el análisis requerido. En esta etapa el analista se debe valer de una serie de algoritmos (aritméticas o lógicas), operaciones de contexto (diferencia de los valores de los pixeles vecinos) con el fin de delimitar y combinar determinadas características del terreno para una lectura espacial del mismo. Los datos geográficos se presentan de dos formas: como ráster y como vector, como se menciona en líneas anteriores. Para el análisis espacial se debe tomar en cuenta la naturaleza del dato geográfico, para escoger los métodos y procedimientos más conveniente (Cruz, 2009; Del Bosque et al., 2012; Peña et al., 2008).

El análisis de los datos vectoriales es el más extensamente desarrollado y usados en los SIG. Se centra en el estudio de las variables temáticas desde un alcance descriptivo e inferencial. Se basa en técnicas del análisis estadístico clásico sin perder la particularidad de los datos espaciales. Los datos vectoriales se analizan a partir de su geometría y sus atributos, como el área, perímetro, longitud de líneas, cálculo de distancias, autocorrelación espacial, mapas de puntos y análisis de proximidad. En los datos vectoriales son los objetos de estudio principal de la Teledetección, ya explicado en capítulos anteriores. Los algoritmos se aplican a la estructura del pixel, su unidad espacial mínima. Se suele dividir el análisis en dos niveles, análisis global, tomando toda la extensión de un área de interés, y al análisis local, centrado en un sector específico y las vecindades. El análisis se centra en los aspectos temáticos (reclasificación, obtención de estadísticos, etc.) y atributos espaciales (forma, tamaño, distancia, proximidad y vecindades, etc.) (Del Bosque et al., 2012; Peña et al., 2008).

Los productos que derivan del análisis de datos vectoriales y ráster pueden ser para calcular matriz de confusión, la pendiente, orientación del relieve, incidencia de la luz, análisis temporal, definir parches según la similitud de los píxeles vecinos, cobertura vegetal, generación de corredores, modelaje, y cálculo de las diversas medidas de exactitud, precisión y error etc. para la generación de modelos. También se puede desglosar un problema en unidades menores de análisis para un estudio más detallado (González, 1994?; Llactayo et al., 2013).

2.11.7 Fuentes de error

La fiabilidad de los datos repercute inexorablemente en el resultado final del proyecto. Es por ello que es necesario evitar los errores metodológicos en las diferentes etapas del proceso (observación, medida, recopilación de datos, digitalización, etc.) de elaboración de los productos (mapas, repostes, gráficas, etc.) teniendo especial cuidado en las etapas de medida y el procesamiento de los datos. La evaluación de la fiabilidad de los mapas se realiza en tres etapas: Selección de área de referencias, diseño de muestreo y análisis de datos (Llactayo et al., 2013; Peña et al., 2008).

Frecuentemente se juzga la fiabilidad de los resultados según su apariencia visual. Práctica insuficiente debido a que los valores erróneos se puede ocultar o “eclipsar” por la abundancia de información presentada. Cuando se manipula datos espaciales se debe la intrínseca incertidumbre (temática, posición y temporal) que derivan de ellos. Los errores pueden ser: identificación errónea, error de asignación de una categoría, error de georreferenciación, error en el equipo GPS, y en la conversión entre los formatos ráster-vector (CIT, 2009; Burrough & McDonnell, 2000).

Según Kang-tsung (2006), considera los siguientes factores que originan los errores:

- Exactitud en el contenido: En los atributos de cada objeto (punto, línea o polígono).
- Errores de medicación en campo: Las observaciones no se realizaron con el debido cuidado restando en fidelidad y precisión o los datos fueron sesgados por el observador. Es importante la redacción de una metodología clara y sencilla para la observación en campo.
- Exactitud de localización: El error en la ubicación de los datos espaciales usando un GPS es producto de un trabajo en campo ineficiente o distorsión en el mapa base.
- Variación espacial a lo largo de escalas: Se debe a las fuentes locales de variación

espacial y usar un rango pequeño en las unidades de datos mapeados. Esto genera que a la escala de toma de datos no coincida con la escala donde se puede visualizar el patrón espacial (Turner et al., 1989).

Otro aspecto que puede generar errores en la presentación de los resultados son los mapas coloreados de forma convencional (según las áreas homogéneas) no es capaz de representar los cambios graduales entre límites y los límites que varían ampliamente, este problema es recurrente en los mapas de vegetación y el de clasificación de suelos. Se debe por tanto identificar las zonas de transición o las más heterogéneas e incluirlo dentro del sistema de categorías de las coberturas (Küchler, 1988c; Peña et al., 2008).

III. MATERIALES Y MÉTODOS

3.1 Equipos y materiales

a. Equipos

- GPS modelo OREGON 650 marca GARMIN
- Cámara fotográfica de modelo D5300 marca NIKON
- Balanza de resorte de 12 kg marca Pocket Balance
- Estufa eléctrica
- Balanza digital de 600 g modelo BQY600 marca Henkel
- Laptop Core i5 Procesador AMD E-350 1,6 GHz 4 GB RAM marca LENOVO

b. Materiales

- Pico
- Pala
- Machete
- Bolsas de papel N° 15 y N° 20
- Bolsas de rafia y plástico
- Wincha o cinta métrica de 5 metros
- Tijera de podar
- Materiales de escritorio (lápiz, borrador, tajador, plumón indeleble punta fina y punta gruesa; y regla)
- Libreta de apuntes
- Pilas AA y AAA
- Formatos de toma de datos (ver *Anexo 1, Anexo 2, Anexo 3, Anexo 5, Anexo 6, Anexo 7, Anexo 8, Anexo 9 y Anexo 10*)
- Ficha de Capacitación (ver *Anexo 4*)
- *Softwares*: ENVI, ArcGIS, *software* R y LibreOffice

3.2 Área de estudio

a. Ubicación geográfica

Según Carta Nacional del Instituto Geográfico Nacional del Perú (2017) la zona de estudio está ubicada en distrito de Cajatambo, provincia de Cajatambo, en el área de influencia de la capital distrital del mismo nombre; se ubica al NE de la región de Lima Provincias en la parte occidental de la cordillera andina, y está limitada por los departamentos de Ancash, Huánuco y Pasco (ver Figura 9). Forma parte del área de amortiguamiento de la zona reservada Cordillera Huayhuash. El distrito está comprendido desde los 2600 a los 4500 msnm y el pueblo Cajatambo (WGS 1984 282116.38 m E – 8841191.99 m S UTM Zona 18 S) está ubicada a 3380 msnm.

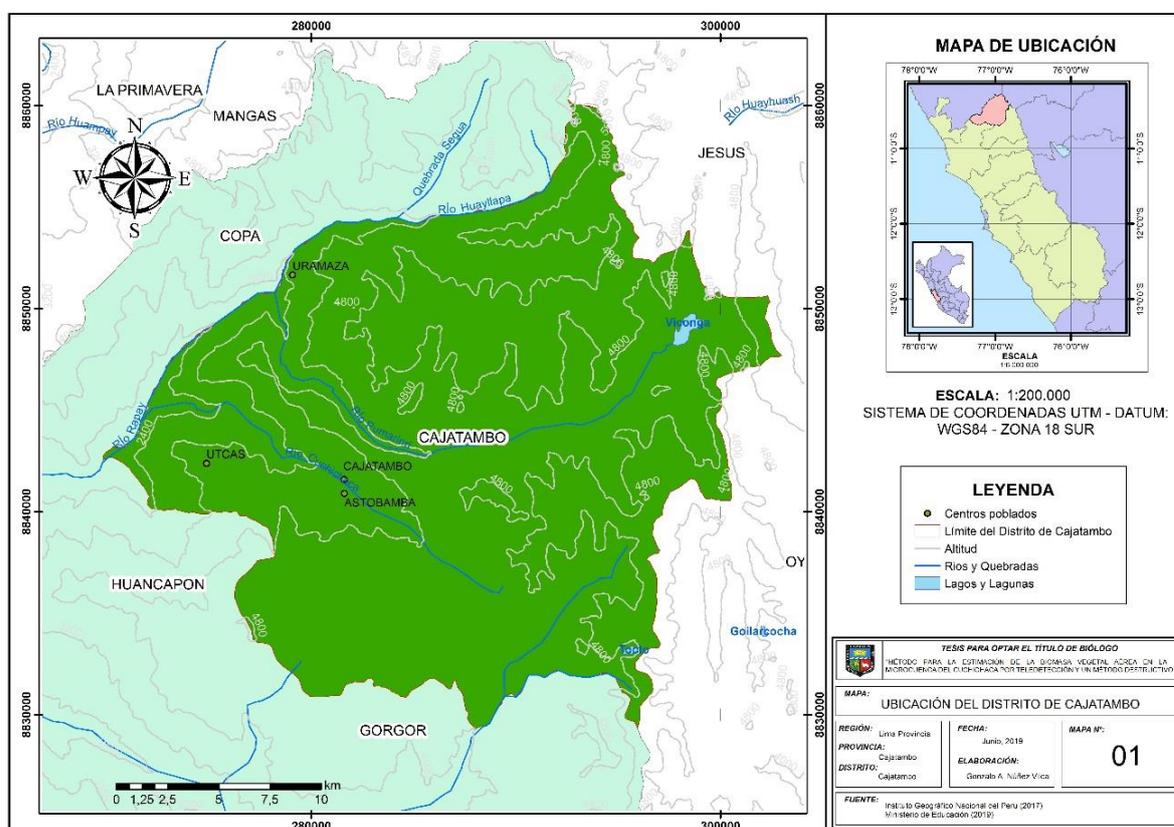


Figura 9. Mapa de la localidad del distrito de Cajatambo.

FUENTE: Elaborado con base a la Carta Nacional del Perú del Instituto Geográfico Nacional del Perú (2017).

Según el Mapa de Cuencas Hidrológicas del Perú del Instituto Nacional de Defensa Civil (INDECI) (2003) la zona de estudio se encuentra ubicado en la unidad hidrológica de “Cuenca Pativilca” perteneciente a la cuenca hidrológica del río Pativilca. Esta cuenca

pertenece a la vertiente del Pacífico (ver Figura 10). La Cuenca Pativilca tiene una superficie de 4577,24 km², una altitud media de 4800 msnm y una pendiente promedio de 0,08 m.

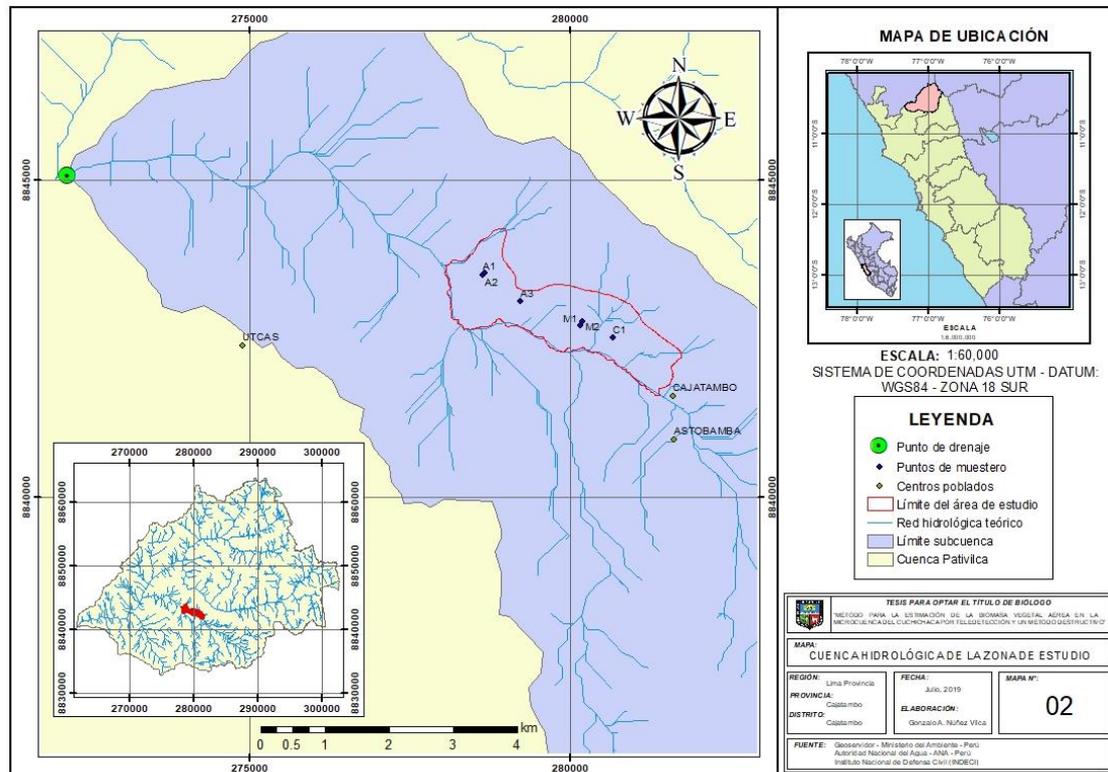


Figura 10. Mapa de la cuenca hidrológica de la zona de estudio.

FUENTE: Elaborado con base en el Mapa de Cuencas Hidrológicas del Perú del Instituto Nacional de Defensa Civil (INDECI) (2003).

b. Clima

Según CuscoPeru (2018) y Servicio Nacional de Meteorología e hidrología (SENAMHI) (2018) el distrito de Cajatambo pertenece a dos pisos altitudinales: El piso templado (entre los 2000 y 3500 msnm) y el piso templado frío (entre los 3500 y 4000 msnm) como se detalla a continuación:

- El clima del piso templado (2000 a 3500 msnm) o región Yunga-Quechua es el clima templado subhúmedo, donde la temperatura media anual es de 10 a 16°C, las temperaturas máximas anuales cercanas a 29°C por su mayor exposición al sol, y las temperaturas mínimas anuales se encuentran entre los -7°C y -4,4°C. En general, existe una alta amplitud térmica diaria. Con una precipitación media anual de 500 mm.
- El clima del piso templado frío (3500 a 4000 msnm) o región Quechua-Suni es el clima frío o boreal. Es el límite inferior de la puna. Su temperatura media está com-

prendida entre 7 y 10°C, las temperaturas máximas entre 19 y 22,5°C y las temperaturas mínimas están entre los -1,3°C y los -16,8°C. Su amplitud térmica anual puede llegar a alcanzar los 38,3°C. Con una precipitación media anual de 700 mm.

3.3 Métodos

3.3.1 Ubicación y caracterización de las parcelas de muestreo

a. Temporada de muestreo

La presente investigación se ejecutó los días 26 y 27 de abril del 2018, periodo inmediatamente después de la temporada de lluvias en la región andina. Se escogió dicha fecha debido a que la vegetación presenta su máxima vigorosidad fenológica posterior a las lluvias y es el momento de mayor importancia ecológica de la biomasa aérea de la vegetación (Cáceres et al., 2015; Nabors et al., 2006; Ónodi et al., 2017; Pareja Paz, 1936; Taiz & Zeiger, 2004).

b. Escala de estudio

En la selección de la escala de estudio de los mapas de vegetación se siguió la sugerencia de Cáceres et al. (2015), Giacomini citado por Küchler (1988) y Holling (1992). Se usó la Microescala, es decir, una escala en el rango de 1: 12.000 para correlacionar las fitocenosis con las características de sus sitios. A esta escala, los mapas de vegetación pueden presentar detalles florísticos capaces de retratar las condiciones ecológicas de manera más efectiva. Así como, al ser una escala local, se desarrollan los procesos vegetales; y la emergencia de los patrones, discontinuidades y regiones de invariancia de escalas haciéndolo una escala óptima para la aplicación de sistemas sensoramiento remoto.

c. Número y tamaño de las parcelas de cosecha

Dado que el método destructivo implica pérdida del material vegetal por parte del ecosistema, Ónodi et al. (2017) recomiendan que este factor se considere como un criterio adicional para establecer el número y tamaño de las parcelas de cosecha para cada sector de la zona de estudio. Para ubicación de las parcelas de cosecha se siguió un muestreo aleatorio para cada sector y la accesibilidad de la zona.

La selección del tamaño de la parcela se siguió la “conjetura de *Goldiloks*” (Wiens, mencionado por McArthur citado por Holling 1992). Se realizó 3 tamaños diferentes de parcelas de cosecha: 1m², 2m² y 4m² de extensión horizontal. Se escogió estos tamaños debido a las dificultades que representa la cosecha y pesaje en campo del material vegetal y

porque el rango del tamaño de la parcela es recomendado para estudios de producción primaria y florísticos (Küchler & Zonneveld, 1988; Ónodi et al., 2017). La forma dimensional fue cuadrada debido a las condiciones del terreno y facilidades para la limitación de la parcela de cosecha (ver Figura 11) (Ónodi et al., 2017).

Küchler y Zonneveld (1988) y Ónodi et al. (2017) recomiendan tener un número de puntos lo suficientemente grande y espacialmente dispersos para estudios referentes a la biomasa en especial si estos fueron contrastados con imágenes de sensoramiento remoto. Se realizó 9 repeticiones para cada tamaño de parcela de cosecha de biomasa vegetal aérea y estuvo en función de las capacidades logísticas y recursos materiales.

Se instaló unas guías que delimitaron la parcela de cosecha (ver Figura 11). En las secciones a continuación se detallan el procedimiento para la cosecha.



Figura 11. Ubicación, delimitación y cosecha de los puntos de muestreo

d. Caracterización morfológica, estructural y fisionómica

Se instaló unas guías que delimitaron la parcela de caracterización. Para la descripción de las formas tridimensionales se realizó una descripción de la estructura, tamaño y forma de la vegetación en el espacio, es decir, en los planos vertical y horizontal. Para sí describir el perfil de la vegetación y el patrón respectivamente. Debido a la escala de estudio, se tuvo especial énfasis en el macro patrón usando el tipo “patrón de mosaico” (Küchler, 1988e, 1988d; Mueller-Dombois & Ellenberg, 1974; Zonneveld, 1988).

Para el estudio morfológico, estructural y fisionómico se identificó el aspecto general de los parches basado en la forma de crecimiento, forma de vida, estructura, tamaño y forma

de las formaciones vegetales dominantes se usó el formato del Anexo 5, Anexo 6, Anexo 7, Anexo 8, Anexo 9 y Anexo 10 para la caracterización de la parcela (Küchler & Zonneveld, 1988; Matteucci & Colma, 2002). Se tomó un registro fotográfico de las estructuras vegetales, del paisaje y de los objetos más relevantes de la zona. El registro fotográfico fue etiquetado según la parcela de cosecha.

Se siguió la recomendación de Mueller-Dombois y Ellenberg (1974) para los valores empíricos del área mínima para la caracterización de vegetación (ver Tabla 4) para zonas templadas estimados a partir del método Relevé. Cabe precisar que la zona de estudio se encuentra en una zona tropical, por lo cual son valores referenciales.

Tabla 4: Valores empíricos para el área mínima de la parcela

Tipo de comunidad vegetal	Área mínima (m ²)
Pastos fertilizados	5 – 10
Praderas secas	50 – 100
Comunidades de malas hierbas agrícolas	25 – 100

Nota: Recuperado de Mueller-Dombois y Ellenberg 1974.

e. Identificación de especies

Se identificó las especies botánicas dominantes de la parcela con apoyo de una guía de identificación de especies propias de la zona (ver Anexo 5). Las especies que no se lograron identificar solo se registró su fisionomía. La identificación de especies es referencial por lo cual no fue necesario un estudio detallado de la diversidad biológica y no se realizó colecta botánica (Küchler & Zonneveld, 1988; Mueller-Dombois & Ellenberg, 1974; Ónodi et al., 2017).

3.3.2 Cosecha de la biomasa vegetal aérea

Se ubicó, estableció y delimitó las parcelas de cosecha tomando en cuenta la densidad de las especies, las especies dominantes de la comunidad, las frecuencias y sus coberturas según el tipo de comunidad y homogeneidad de la zona (Mueller-Dombois & Ellenberg, 1974). Para definir las especies dominantes se usó los criterios sugeridos por Avolio et al. (2019), en la cual una especie dominante es aquella que tienen una alta abundancia en relación con otras especies en una comunidad (mayor a 12% del área), y tienen efectos proporcionados en condiciones ambientales, diversidad comunitaria y/o función en el ecosistema.

En las parcelas de cosecha se realizó una extracción de la biomasa vegetal aérea. Se pesó

in situ, usando la balanza de resorte de 12 kg marca Pocket Balance, la muestra cosechada para obtener el peso húmedo en campo de cada parcela de cosecha (Singh et al., 1975). Se usó el Anexo 1 para el registro de datos.

Posterior al pesado del peso húmedo se tomó una alícuota representativa de la parcela cosechada (García, 2010; Ónodi et al., 2017; Singh et al., 1975). Las alícuotas contuvieron hojas, ramas, fustes, flores y frutos presentes en la parcela de forma proporcional y representativa de las especies presentes (García, 2010; Ónodi et al., 2017; Singh et al., 1975). Las muestras fueron etiquetadas según se indica en el Anexo 2, embaladas y trasladadas cuidadosamente al gabinete en el Laboratorio de Ecología de Procesos de la Universidad Nacional Agraria La Molina evitando la pérdida o degradación del material para su posterior secado y pesado. Concluido esta etapa se recogieron las guías que delimitaron la parcela (ver Figura 11, Figura 12, Figura 13, Figura 14 y Figura 15).



Figura 12. Ubicación y delimitación de los puntos de muestreo



Figura 13. Cosecha de los puntos de muestreo



Figura 14. Cosecha de los puntos de muestreo



Figura 15. Embalaje y rotulado de las alícuotas

3.3.3 Secado de las alícuotas de biomasa

En el Laboratorio de Ecología de Procesos (LEP) de la Universidad Nacional Agraria La Molina las alícuotas fueron preparadas (se eliminó la tierra, piedras u otras impurezas y se restó del peso de la alícuota) para su secado en la estufa eléctrica de 70 °C a 80°C por 48 horas aproximadamente hasta obtener un peso constante (ver Figura 16). (Flores-Nieves et al., 2011; Ónodi et al., 2017). Se pesó y se calculó el peso seco usando la fórmula propuesta por Snowdon et al. citado por García (2010), la formula se detalla a continuación, posterior a ello se registró el peso seco según el formato del Anexo 3. Concluido esta etapa se procedió al desecho de la biomasa vegetal secada.



Figura 16. Bolsas de papel con las alícuotas en gabinete.

Se siguió la sugerencia de Snowdon et al. citado por García (2010) para el cálculo del peso seco de las parcelas de cosecha a partir del peso seco de las alícuotas, según la siguiente relación:

$$\text{Peso Seco parcela} = \text{Peso Húmedo parcela} \times \frac{\text{Peso Seco alícuota}}{\text{Peso Húmedo alícuota}}$$

Donde:

Peso Seco parcela = Peso seco por parcela (g MSV/m²).

Peso Húmedo parcela = Peso húmedo para la muestra tomada en campo (g/m²).

Peso Seco alícuota = Peso seco de la alícuota (g MSV).

Peso Húmedo alícuota = Peso húmedo de la alícuota tomada en campo (g).

3.3.4 Cálculo de los índices de vegetación

a. Adquisición de las imágenes satelitales

Por medio de los representantes de la Universidad Nacional Agraria La Molina ante el Centro Nacional de Operaciones de Imágenes Satelitales (CNOIS) del Comisión Nacional de Investigación y Desarrollo Aeroespacial (CONIDA) se encargó la solicitud (ver Anexo 20), y adquisición de una imagen del satélite SPOT 6 tomado el 18 de junio del 2017 siendo la fecha más próxima y de la misma estación, posterior a lluvias en que se ha ejecutado la investigación, disponible. Según el proveedor de la imagen solicitada, presenta un procesamiento de ortorrectificado, además, presenta una corrección radiométrica y geométrica.

A través del portal Web de la U.S. Geological Survey (USGS) (disponible en <https://earthexplorer.usgs.gov>) se adquirió dos imágenes satelitales: 1) Imagen del satélite LANDSAT 8, tomado el 18 de abril del 2018, siendo la fecha más próxima disponible. Según el sistema WRS-2 el área de estudio corresponde a Path: 18 y Row: 67. Presenta un nivel de procesamiento L1TP, es decir, una corrección de precisión y terreno usando puntos de control del suelo (GCP) y un modelo de elevación digital (DEM) (U.S. Geological Survey (USGS), 2019) por lo cual es necesario un tratamiento previo antes del procesamiento de la imagen. 2) Imagen del satélite SENTINEL-2A, tomada el 19 de abril del 2018, siendo la fecha más próxima disponible. Según la malla mundial de barrido de SENTINEL-2 el área de estudio corresponde a 18LTP. Presenta un nivel de procesamiento 1C, es decir, presenta corrección radiométrica y geométrica, incluye ortorrectificación y está en valores de reflectancia (TOA) (European Space Agency (ESA), n.d.-a), por lo cual es necesario un tratamiento previo antes del procesamiento de la imagen.

b. Tratamientos previos de las imágenes satelitales

- Calibración del sensor: Usualmente indicado en el metadato adjunto a la imagen satelital. Las calibraciones como el ángulo de la adquisición, error propio del sensor, etc. Se omitió este procedimiento, ya que los proveedores realizaron esta calibración.
- Conversión de ND a Reflectancia: Se usó la herramienta “Radimetric calibration” del *software* ENVI para la imagen LANDSAT 8.
- Corrección topográfica: Se omitió este procedimiento ya que los proveedores realizaron esta corrección.
- Corrección atmosférica: Se usó la herramienta “Dark Object Substration” (o método

DOS) del *software* ENVI para las imágenes LANDSAT 8 y SENTINEL-2A.

- *Pan-sharpening*: Se realizó para la mejora de la visualización de la imagen al combinar la imagen RGB con el Pancromático. Se escogió el método “Gram-Schmidt Pan Sharpening” del *software* ENVI debido a las características de las imágenes SPOT 6, LANDSAT 8 y SENTINEL-2. Debido que es un método con el cual se puede corregir varias bandas

c. Cálculo de los índices de vegetación

Se aplicó un cálculo aritmético de las bandas espectrales para cada una de las fórmulas de índices de vegetación planteadas por varios autores. Se usó la herramienta “*Raster calculator*” y “*ModelBuilder*” del *software* ArcGIS para los cálculos pertinentes. A continuación, se detallan las fórmulas que se emplearon. Están divididas en dos grupos: índices basados en la pendiente e índices basados en la distancia:

i. Índices Basados en la pendiente

1. Índice de Vegetación de Diferencia Normalizada (NDVI) fórmula propuesta por Turkey y Sellers (1986):

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

Donde:

NDVI= Índice de Vegetación de Diferencia Normalizada.

NIR= Reflectancia en el infrarrojo cercano $\lambda = 0.76-0.90$.

RED= Reflectancia en el rojo $\lambda = 0.63-0.69$.

2. *Atmospherically Resistent Vegetation Index* (ARVI) (o Índice de Vegetación Resistente Atmosférica en español) fórmula propuesta por Kaufman y Tanre (1992):

$$ARVI = \frac{NIR - RB}{NIR + RB}$$

$$RB = RED - \gamma(BLUE - RED)$$

Donde:

ARVI: *Atmospherically Resistent Vegetation Index*.

NIR: Reflectancia en el infrarrojo cercano.

RED: Reflectancia en el rojo.

BLUE: Reflectancia en el azul.

RB: Reflectancia en el rojo-azul.

γ : Parámetro de calibración atmosférica.

3. *Moisture adjusted vegetation index* (MAVI) (o Índice de vegetación ajustada por humedad en español) fórmula propuesta por Zhu et al. (2014):

$$MAVI = \frac{NIR - RED}{NIR + RED + SWIR}$$

Donde:

MAVI= *Moisture adjusted vegetation index*.

NIR= Reflectancia en el infrarrojo cercano.

RED= Reflectancia en el rojo.

SWIR= Reflectancia del infrarrojo de onda corta en el $\lambda = 1,5-1,75 \mu\text{m}$

ii. Índices de Vegetación Basados en la Distancia

1. *Soil-Adjusted Vegetation Index* (SAVI) (o Índice de Vegetación Ajustada al Suelo en español) fórmula propuesta por Huete (1988):

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

Donde:

SAVI: *Soil-Adjusted Vegetation Index*.

NIR= Reflectancia en el infrarrojo cercano.

RED= Reflectancia en el rojo.

L = Constante que depende del tipo de suelo.

2. *Optimization of Soil-Adjusted Vegetation Index* (OSAVI) (u Optimización del índice de vegetación ajustada por el suelo en español) fórmula propuesta por Rondeaux et al. (1996):

$$OSAVI = \frac{NIR - RED}{NIR + RED + X}$$

Donde:

OSAVI = *Optimization of Soil-Adjusted Vegetation Index*.

NIR= Reflectancia en el infrarrojo cercano.

RED= Reflectancia en el rojo.

X = Parámetro para la minimización de los efectos del suelo.

3. *Soil Adjusted and Atmospherically Resistant Vegetation Index* (SARVI) (o índice de vegetación ajustado por el suelo y resistente atmosféricamente en español) fórmula propuesta por Kaufman y Tanre (1992):

$$SARVI = \frac{NIR - RB}{NIR + RB + L} (1 + L)$$

$$RB = RED - \gamma(BLUE - RED)$$

Donde:

SARVI= *Soil Adjusted and Atmospherically Resistant Vegetation Index*.

NIR= Reflectancia en el infrarrojo cercano.

RED= Reflectancia en el rojo.

BLUE: Reflectancia en el azul.

RB: Reflectancia en el rojo-azul.

γ : Parámetro de calibración atmosférica.

L = Constante que depende del tipo de suelo.

4. *Enhanced Vegetation Index* (EVI) (o Índice de Vegetación Mejorada) fórmula propuesta por Liu & Huete (1995):

$$EVI = G \frac{NIR - RED}{L + NIR + c_1 \cdot RED - c_2 \cdot BLUE}$$

Donde:

EVI: *Enhanced Vegetation Index*

NIR= Reflectancia en el infrarrojo cercano.

RED= Reflectancia en el rojo.

BLUE= Reflectancia en el azul.

L = Constante que depende del tipo de suelo (L=1).

G= Factor de ganancia (G=2,5).

C₁= Cociente de corrección atmosférica para la banda roja (C₁= 6).

C₂= Cociente de corrección atmosférica para la banda azul (C₂= 7,5).

d. Cálculo de estadísticos de las imágenes

Se usó la herramienta “*Compute Statistics*” del *software* ENVI para calcular la estadística para cada índice de vegetación relevantes: histograma, rango, coeficiente de varianza, etc.

3.3.5 Análisis estadísticos

a. Selección del área optima de cosecha

Se usó el *software* libre *LibreOffice* para la digitalización de los datos de biomasa. Se usó el *software* R para todos los cálculos estadísticos (Ver Anexo 14, Anexo 15 y Anexo 16). Se calculó la estadística descriptiva de los datos de biomasa (media, máximo, mínimo, rango, cuartiles, etc.) y el coeficiente de variación (CV). Se usó el método de máxima curvatura para determinar el tamaño de la parcela óptima por la simpleza y sencillez de su aplicación e interpretación (Saste & Sananze, 2015).

Para aplicar este método se debe calcular el coeficiente de variación (CV) de los datos de las muestras de biomasa vegetal aérea seca para cada tamaño de las parcelas evaluadas, es decir, para 1m², 2m² y 4m² de superficie horizontal. Posterior a ello, se grafica en un plano en función del coeficiente de variación con su correlativo tamaño de parcela. Para determinar el tamaño óptimo se debe trazar una proyección, paralela al eje de las ordenadas, desde el punto de máxima curvatura hasta el eje de las abscisas. En este tamaño de la parcela sugerido es considerado como el más conveniente para el estudio al presentar menor coeficiente de variación y menor error experimental. Además de ello, se realizó un diagrama de cajas de los datos de biomasa según el tamaño de la parcela para un mejor análisis visual de la simetría de los datos y eliminar los valores atípicos en caso de presentarse.

b. Análisis espacial de los datos de biomasa

Una vez que se seleccionó la “parcela de cosecha optima”, se procedió a cargar los datos a un archivo *Shapefile* (.shp) para ello se usó el *software* ArcGIS. En todos los cálculos del análisis espacial se usó el *software* ArcGIS. Se realizaron dos procesos. El primero, se realizó un análisis exploratorio, se usó el índice I de Moran para conocer si los datos presentan autocorrelación espacial (Iriondo et al., 2008). Se usaron las herramientas “*Spatial Autocorrelation (Morans I)*”.

El segundo, para la visualización de la gradiente de la biomasa en la zona de estudio se aplicó un modelo de interpolación Kriging, la elección del método está en función de la naturaleza de los datos y del nivel de análisis del método (Gallardo & Maestre, 2008). Se

usó el visor “*Geostatistical wizard*” de la barra “*Geostatistical Analyst*”.

c. Extracción de los valores del raster según los puntos de muestreo de la biomasa vegetal aérea seca

Se usó la herramienta *Extract Values to Points* del *software* ArcGIS para extraer los valores del *raster*, calculado para cada índice de vegetación. Los puntos extraídos son correlativos espacialmente a los puntos de muestreo de las parcelas de cosecha (Aguilar et al., 2012; Ónodi et al., 2017; Zhu & Liu, 2014).

d. Modelo de estimación de la biomasa vegetal aérea por índices de vegetación

En todos los cálculos se usó el *software* R (ver Anexo 17). Se realizó el *test* de Shapiro-Wilk como prueba de normalidad para los datos de biomasa vegetal aérea y los valores de los índices de vegetación, se usó la función “*shapiro.test*” de la extensión “*stats*”.

Posterior a ello se realizó un análisis de correlación para medir el grado de relación entre el peso seco de la biomasa vegetal aérea y con su contraparte valor correlativo espacialmente para cada uno de los 7 índices de vegetación seleccionados. Se usó la correlación de Pearson para relacionar el peso seco de biomasa vegetal aéreo con los índices de vegetación que hayan presentado normalidad. Para la relacionar el peso seco de biomasa vegetal aéreo con los índices de vegetación que no presentan normalidad se usó la correlación de Spearman y Kendall.

Con el *test* t-student se analizó la significancia de la correlación, se usó las funciones “*cor*” y “*cor.test*”, respectivamente, de la extensión “*stats*”. Y se calculó el coeficiente de determinación usando la función “*cor*”.

El análisis de regresión de las variables de peso seco de la biomasa vegetal aérea y los valores correlativos espacialmente de los índices de vegetación se realizó en dos etapas. Primero, se realizó un análisis de varianza (ANOVA). Se usó la función “*anova*” de la extensión “*stats*” para los cálculos correspondientes. La segunda etapa se formuló un modelo estadístico de regresión a partir de los datos de biomasa vegetal aéreo y los valores de los índices de vegetación (Cáceres et al., 2015; Castillo et al., 2017; Ónodi et al., 2017; Schirrmann et al., 2016). Se usó la función “*lm*” de la extensión “*stats*” y la función “*summary*” incluido por defecto en el *software* R para los cálculos correspondientes.

Posterior a ello, se propuso 5 modelos de regresión lineal para los casos en los que los valores de los índices de vegetación llegaron a cumplir con las condiciones previas y con

un coeficiente de determinación mayor o igual a 0,5 con el peso seco de la biomasa vegetación aérea. Con estos resultados obtenidos se realizó un análisis del modelo de regresión. Se graficó los resultados usando la función “*plot*” de la extensión “*graphics*”, la función “*ggplot*”, “*geom_point*” y “*geom_smooth*” de la extensión “*ggplot2*” del *software* R.

Para el análisis de los residuos se realizó tres pruebas: normalidad, heterocedasticidad y prueba de independencia de los residuos. Para la prueba de normalidad de los residuos se realizó el *test* de Shapiro-Wilk, se usó la función “*shapiro.test*” de la extensión “*stats*”. Para la prueba de homocedasticidad de los residuos se realizó el *test* de Breusch-Pagan, se usó la función “*ncvTest*” de la extensión “*car*”. Para la prueba de independencia de los residuos se realizó *test* de Durbin-Watson, se usó la función “*dwtest*” de la extensión “*lmtest*”.

e. Selección del mejor modelo de estimación

Se usó la raíz del error cuadrático medio o *root Mean Squared Error* (RMSE) como criterio de selección del modelo de estimación (Asrar et al., 2010; F Baret et al., 1993; Castillo et al., 2017; Darvishzadeh et al., 2006; Du et al., 2010; Fan & Liu, 2016; Ónodi et al., 2017; Schirrmann et al., 2016; Tian et al., 2016; Zhu et al., 2014; Zhu & Liu, 2014). Se usó la función “*rmse*” de la extensión “*Metrics*” del *software* R (ver Anexo 17).

3.3.6 Elaboración de mapas

a. Elaboración del mapa de biomasa vegetal aérea estimada

Se elaboró el mapa de biomasa estimada usando el modelo de regresión de mejor ajuste de estimación. Se usó la herramienta *Raster calculator* del *software* ArcGIS para los cálculos pertinentes. Para la presentación de los resultados obtenidos se usó el *software* ArcGIS para la elaboración del mapa. En la Figura 17 se presenta la secuencia gráfica del procedimiento seguido anteriormente detallado para la elaboración del mapa de biomasa estimada.

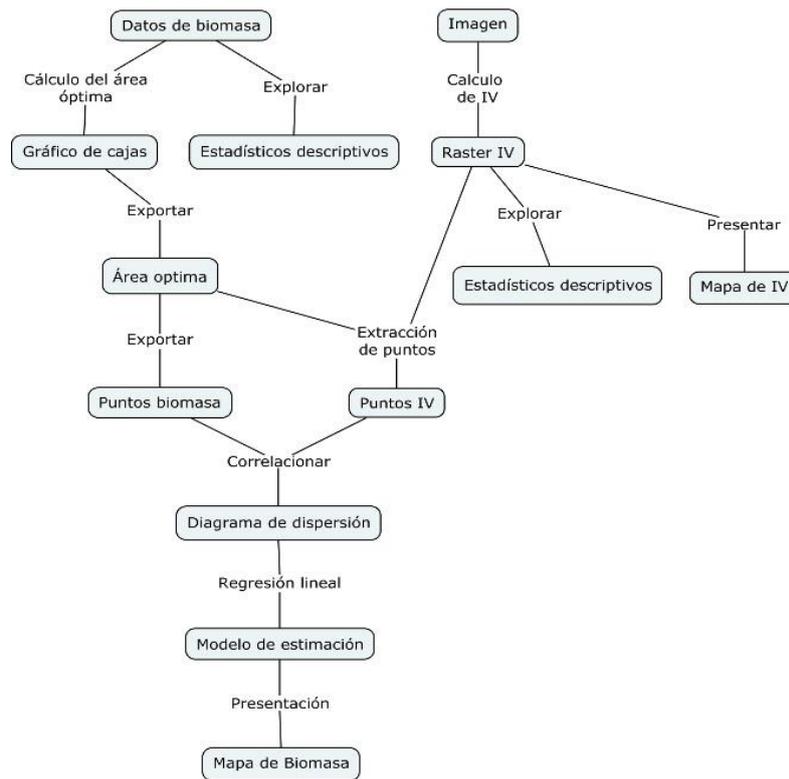


Figura 17. Resumen de la elaboración del mapa de biomasa estimada

b. Elaboración del mapa de cobertura vegetal

Se usó el *software* ENVI para el procesamiento de la imagen satelital. Se realizó una clasificación supervisada, dependiendo de las características de la imagen, se usó el método de “firmas espectrales”. Posterior a ello realizó una posclasificación para eliminar pixeles perdidos y simplificar coberturas aisladas usando los siguientes métodos ofrecidos por el *software* ENVI: *Sieve classes*, *rule classifier* y *clump classes*. Con los datos tomados en campo se realizó la definición, corrección y descripción de las coberturas. También se realizó una corrección visual usando los mapas en color natural y falso color de la zona de estudio para el satélite SENTINEL-2 (ver Anexo 18 y Anexo 19). Se exportó los resultados para su presentación al *software* ArcGIS. En el Figura 18 resume de forma gráfica el procedimiento seguidos anteriormente detallado para la elaboración del mapa de cobertura vegetal.

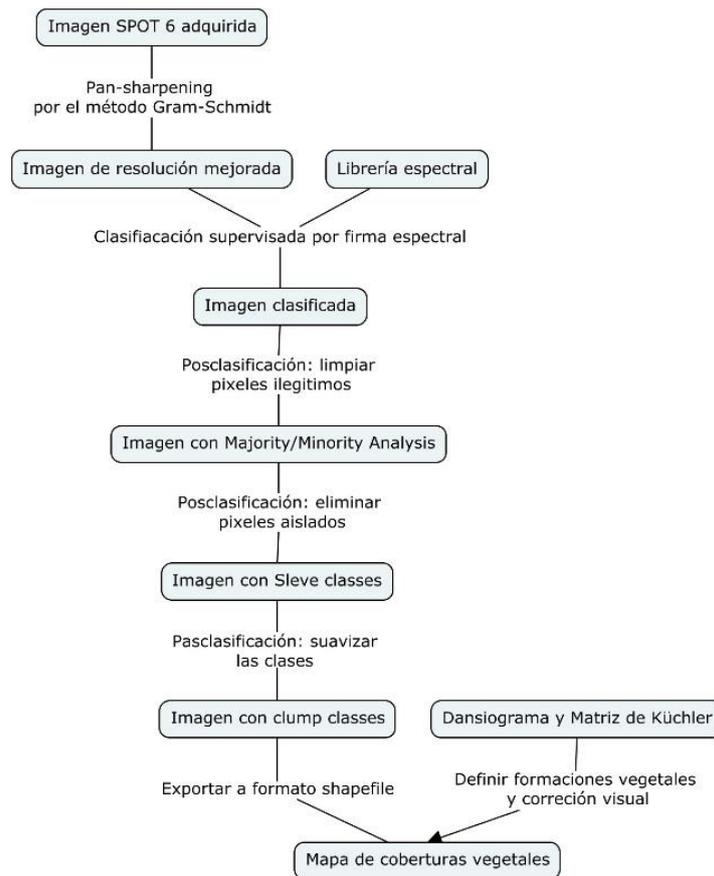


Figura 18. Resumen de la elaboración del mapa de coberturas vegetales

c. Elaboración de los mapas auxiliares

Se siguió la sugerencia de Kannegieter (1988) y se elaboró mapas auxiliares sobre caracterización del terreno. Para la confección de los mapas auxiliares se siguió las siguientes etapas (Mancebo et al., 2008; MINAM, 2018):

1. Abrir un proyecto nuevo en el software ArcGIS
2. Establecer las propiedades del nuevo proyecto. Se debe tomar en cuenta en la configuración definir las unidades del proyecto en metros (m), la proyección debe ser UTM (Universal Transverse Mercator), para el caso de la zona de estudio debe usarse la zona 18S, y el datum WGS 84.
3. Recopilación de información geográfica y capas. Se descargaron las capas de información geográficas requeridas de forma gratuita desde los portales del Estado: Geoservidor del MINAM (Ministerio del Ambiente) y GeoIDEP (Infraestructura de datos espaciales del Perú).
4. Las capas de información espacial descargadas fueron importados al proyecto del software ArcGIS. Se re proyectó las capas a la proyección geográfica del proyecto en

los casos requeridos. Se usó una capa específica para elaborar cada mapa temático. En la Tabla 5 se detalla las capas y los mapas elaborados, así como las herramientas utilizadas.

5. Se diseñó la plantilla del proyecto para la presentación de las capas de información geográfica. Se agregó un marco, una leyenda, símbolo del norte geográfico, la escala gráfica y la escala numérica, el título, la grilla de las coordenadas, dos minimapas de ubicación de referencia, uno para ubicar la región de Lima Provincias y otra de ubicación de la provincia donde se desarrolló el proyecto; y la etiqueta del mapa con los datos referentes a la ubicación política de la zona de estudio, fecha de elaboración, fuente y número del mapa.
6. Se aplicó una paleta de colores y simbología a las capas y elementos del mapa. Se tuvo especial cuidado en los contrastes del texto con las capas para evitar confusiones al momento de interpretarlos.
7. Exportar el mapa temático elaborado para su impresión.

Tabla 5: Mapas Auxiliares

Mapa	Descripción
Orientación del terreno	Identifica la dirección de la pendiente del terreno. Esa capa es calculada a partir del DEM. Toma en cuenta los cambios en la altitud de los píxeles vecinos. El ráster de salida representa el terreno en función de la dirección de la pendiente tomando como referencia el norte geográfico usando una paleta de colores. Está relacionado con el flujo hídrico del terreno y es necesaria para el análisis hidrológico. Se usa la herramienta <i>Aspect</i> del software ArcGIS para generar esta capa.
Relieve de sombra	Refleja la topografía de la superficie a partir del DEM. Se basa en representar las sombras del terreno a partir de una iluminación hipotética proyectada en el terreno. Toma en cuenta los cambios de la iluminación de los píxeles vecinos. Se usa la herramienta <i>Hillshade</i> del software ArcGIS para generar esta capa.
Curvatura del terreno	Permite la representación de la curvatura de la pendiente del terreno. Realiza un mejor contraste entre las superficies planas, cóncavas o convexas. Permite visualizar las características físicas del drenaje, erosión y escorrentía de una cuenca. Toma en cuenta los cambios en la pendiente de los píxeles vecinos. Se usa la herramienta <i>Curvature</i> del software ArcGIS para generar esta capa.
Topográfico	Representa la distribución del relieve de un terreno. Esa capa es calculada a partir de DEM. Extrae las curvas de nivel a partir del nivel altitudinal de la superficie. La herramienta vectoriza el archivo ráster para generar las isolíneas. Esta variable es esencial para un análisis integral en zonas de montaña. Se usa la herramienta <i>Contour</i> del software ArcGIS para generar esta capa.
Climático	Representa la clasificación climática de Köppen-Geiger en la zona. Esta capa está disponible en el Geoservidor del MINAM y fue elaborada por la SENAMHI. Es importante en los estudios relacionados con la vegetación al proporcionar información al régimen de lluvias, temperatura y otros parámetros meteorológicos. Se puede usar directamente esta capa en la presentación del mapa.
Coberturas de vegetación	Representa las unidades y coberturas vegetales según las especies dominantes, densidad, fisionomía y otros parámetros biofísicos. Sirve de base en los estudios relacionados a la vegetación, desertificación, riegos, estudios de ecosistemas entre otros. Fue elaborado por el MINAM y es de libre disposición en el Geoservidor. Se puede usar directamente esta capa en la presentación del mapa.
Fisiográfico	Representa las características del relieve, del paisaje y el resultado de los procesos de modelación del paisaje. Fue elaborado por la extinta Oficina Nacional de Evaluación de Recursos Naturales (ONERN) y es de libre disposición en el Geoservidor. Se puede usar directamente esta capa en la presentación del mapa.
Cuencas hidrológicas	Representa zona de acumulación del agua captada por la lluvia. El agua acumulada fluye por el relieve del terreno hacia una corriente principal y desemboca en un punto de salida. Es de suma importancia para conocer la disponibilidad hídrica de una zona, la red hídrica, características de los cuerpos de agua, entre otros parámetros. Fue elaborado por la Autoridad Nacional del Agua del Perú (ANA) y es de libre disposición en el Geoservidor. Se puede usar directamente esta capa en la presentación del mapa.

Nota: Adaptado de Mancebo Quintana et al. (2008) y Renda et al. (2017).

IV. RESULTADOS Y DISCUSIONES

4.1 Ubicación de puntos de muestreo

De acuerdo a lo descrito en la metodología de la presente investigación se realizó 8 repeticiones para cada tamaño de parcela de cosecha siguiendo un muestreo aleatorio como se observa en la Tabla 6. El número de repeticiones estuvo en función a la representatividad de la zona, las capacidades logísticas y las condiciones agrestes del terreno.

Tabla 6: Distribución de los puntos de muestreo

Parcela	Coordenada Y (UTM WGS 84)	Coordenada X (UTM WGS 84)
A1	8843502	278634
A2	8843526	278663
A3	8843079	279219
C1	8842508	280662
C2	8842726	280291
M1	8842764	280186
M2	8842702	280160
Max 1	8842329	280932

Küchler & Zonneveld (1988) y Zhu & Liu (2014) recomiendan tener un número de puntos lo suficientemente grande y espacialmente dispersos para estudios referentes a la biomasa, en especial si estos serán contrastados con imágenes de sensoramiento remoto. En la Figura 19 se detalla la ubicación de las parcelas de caracterización.

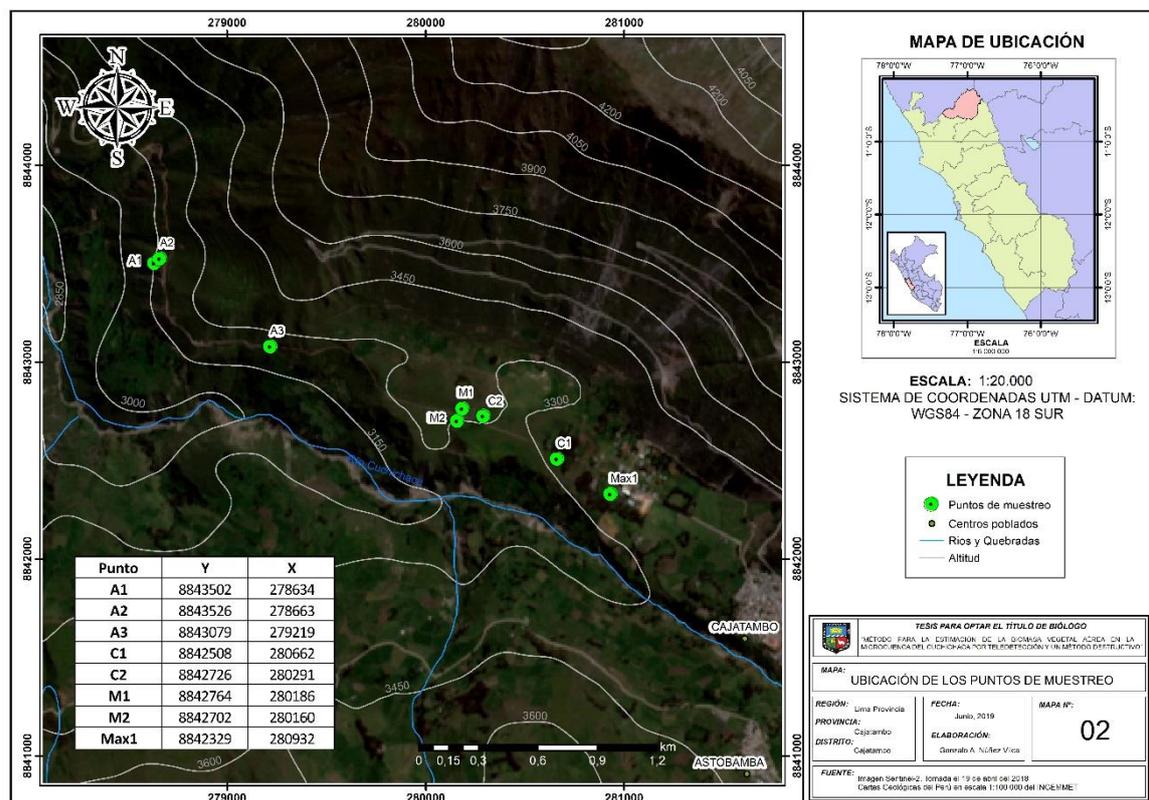


Figura 19. Ubicación de los puntos de muestreo

4.2 Caracterización de las parcelas: morfología, estructura, fisionomía e identificación de especies dominantes

Parcela A1: Se encuentra a una altitud de 3196 msnm. Presenta una formación vegetal en proceso de matorralización (ver Figura 20). Según la matriz de Küchler (ver Anexo 11): La vegetación leñosa tiene una cobertura de 25 por ciento, hojas anchas, esclerófilas o blandas y altura entre 1 m y 1,5 m. La vegetación herbácea, predominantemente graminoides, tiene una cobertura cercana al 25 por ciento, hojas blandas y altura entre 0,1 m y 0,5 m. Los musgos y líquenes tienen una cobertura de 1 a 5 por ciento, hojas briodes pequeñas y blandas, y alturas menores de 0,1 m. Se observó especies de tallo suculento cubre entre el 1-5 por ciento de la superficie, de hojas pequeñas y aguja o grandes y suculentos. El suelo cubre menos del 1 por ciento del área. Fórmula: B3pw G2pw K3as3bk L1bws. Según el Danserograma (ver Anexo 12): Presenta arbustos presenta cobertura discontinua de altura medio (1-1,5m), hojas perennes, mediano y membranoso o esclerófila. Las herbáceas se presenta en grupos o cobertura continua de altura baja (máx. 50 cm), hojas perennes, simples, compuestas o graminoides; de tamaño medio y membranoso. El musgo presenta cobertura discontinua de altura baja (máx. 10 cm), hojas briodes

y membranosas. Las suculentas presenta cobertura muy escasa de tamaño medio (0,5-2 m), de hojas suculentas o perennes, de forma aguja o compuesta, de textura esclerófila o suculenta; y pueden presentar tallo suculento. Las especies identificadas fueron: *Ophiosporus sp.*, *Agave sp* y *Austrocylindropuntia subulata* (Muehlenpf.) Backeb.



Figura 20. Ubicación del punto de muestreo A1

Parcela A2: Se encuentra a una altitud de 3199 msnm. Formación vegetal: Matorral (ver Figura 21). Según la matriz de Küchler (ver Anexo 11): La vegetación leñosa cubre entre el 5-25 por ciento de la superficie de altura de entre 1,5 y 3 m, hoja perenne, ancha, blanda o esclerófila y puede presentar hojas pequeñas. En la vegetación herbácea predominan las gramínoideas. Cubre 50-75 por ciento de la superficie de 0,1 a 0,5 m de altura, las hojas son blandas. La maleza o latifoliada cubre el 25-50 por ciento de la superficie presenta una altura de menos 0,1 m a 0,5 m, las hojas blandas. Los brioides cubren entre el 50-75 por ciento de la superficie, tienen una altura de hasta 0,1 m, las hojas son blandas y pequeñas. Hay presencia de especies de tallos suculentos cubren una superficie de 1-5 por ciento del área de una altura de 0,1 y 0,5 m, las hojas son esclerófilas y pequeñas. Fórmula: B4rw3cw3rhs G2iw H2pw1pw L1iws K2bhs. Según el Danserograma (ver Anexo 12): Presenta una especie arbórea de tamaño bajo (aprox. 3 m), cobertura discontinua, de hoja semidecídua, compuesta y membranosa. Los arbustos presentan cobertura en grupos o discontinua, son de tamaño variable dentro del rango de medianos (0,5 a 2 m), predomina las hojas perennes y medianas; en mejor medida las hojas semidecíduas y hojas compuestas; la textura de la hoja puede ser membranosa o esclerófila. Las hierbas se presentan en grupos o de cobertura discontinua son de tamaño bajo (máx. 50 cm), predomina las hojas perennes y en menor presencia las hojas semidecíduas, pueden ser pequeñas,

compuestas o gramínoideas; de textura membranosa. El musgo presenta cobertura discontinua, de tamaño bajo (máx. 10 cm); hojas son perennes, talosas y de textura membranosa. Las especies identificadas fueron: *Tecoma sp.*, *Ophyosporus sp.*, *Baccharis sp.*, *Calceolaria sp.*, *Salvia sp.*, *Austrocylindropuntia subulata* (Muehlenpf.) Backeb, *Bidens pilosa* L. y *Lachemilla sp.*



Figura 21. Ubicación del punto de muestreo A2

Parcela A3: Se encuentra a una altitud de 3253 msnm. Formación vegetal: Matorral-Pajonal (ver Figura 22). Según la matriz de Küchler (ver Anexo 11): La vegetación leñosa cubre una superficie de cerca del 25 por ciento para las especies pequeñas y 50-75 por ciento para las de mayor altura de una altura de entre los 0,5 a 2,5 m. Las hojas son perennes, anchas, de textura blanda o esclerófila, y pueden presentar hojas pequeñas. La vegetación herbácea predomina las gramínoideas cubren entre el 50-75 por ciento de la superficie, presentan una altura de 0,35 a 1 m, las hojas son blandas o esclerófilas. La maleta o latifoliada cubren entre 25 a 50 por ciento de la superficie, presentan una altura variable de entre 0,1 a 1 m, las hojas son blandas o esclerófilas. Los brioides cubren entre el 5-25% de la superficie, tienen una altura máxima de 0,1 m, las hojas son blandas. Fórmula: B4rw3ihs3pw2rws G3ih2rw H3rw2pws1rhs L1rws. Según el Danserograma (ver Anexo 12): Presenta especies arbustivas, de cobertura discontinua, de tamaño bajo-medio (0,5-2,5 m), las hojas son perennes y a veces semidecíduos de tamaño medio; y la textura de la hoja es membranosa o esclerófila. La vegetación herbácea presenta cobertura discontinua, de altura baja (máx. 50 cm) y excepcionalmente medio (1 m); las hojas son perennes, pequeñas o compuestas y de textura membranosas; hay una alta presencia de especies gramínoideas. Las especies identificadas fueron: *Poa sp.*, *Baccharis sp.*, *Mutisia*

acuminata Ruiz & Pav., *Salvia oppositiflora* Ruiz & Pav., *Gnaphalium* sp., *Mintostachys mollis* (Benth.) Griseb., *Hesperomeles* sp. y *Calceolaria* sp. Y hay especies de las familias: Verbenaceae, Amaranthaceae y Apiaceae.



Figura 22. Ubicación del punto de muestreo A3

Parcela C1: Se encuentra a una altitud de 3314 msnm. Formación vegetal: Herbazales y bosque de eucaliptos (ver Figura 23). Según la matriz de Küchler (ver Anexo 11): La vegetación leñosa es arbórea, cubre una superficie menor al 5 por ciento, de una altura de 20-35 m, las hojas son perennes, anchas, de textura blanda y pequeñas. La maleza o latifoliada cubre una superficie mayor al 75 por ciento, presenta una altura de 0,3 a 0,7 m, de hojas blandas, pueden presentar hojas pequeñas. Fórmula: B7bwl H3bw2cws. Según el Danserograma (ver Anexo 12): Presenta especies arbustivas, se puede presentar en grupos o de cobertura discontinua y por sectores continuos, de tamaño medio-bajo (0,3-0,7 m), las hojas son perennes y a veces semideciduas, pueden ser de tamaño medio o anchos y de textura membranosa. Se presenta una especie arbórea de cobertura discontinua, de gran tamaño (aprox. 30 m), las hojas son perennes, alargadas y anchas; y de textura membranosa. Las especies identificadas fueron: *Cosmos* sp., *Bidens* sp., *Tagetes* sp., *Plantago* sp., *Verbena* sp. y *Eucalyptus globulus* Labill.



Figura 23. Ubicación del punto de muestreo C1

Parcela M1: Se encuentra a una altitud de 3320 msnm. Formación vegetal: pradera posterior a una quema (ver Figura 24). Según la matriz de Küchler (ver Anexo 11): la vegetación arbórea cubre entre 1-5 por ciento de la superficie, de una altura de hasta 0,5 m, presenta hoja perenne, ancha, de textura blanda o esclerófila. La maleza, o vegetación latifoliada, cubre cerca del 75 por ciento de la superficie, presenta una altura máxima de 0,5 m, las hojas son blandas. Los brioides cubren menos del 1 por ciento de la superficie, tienen una altura máxima de 0,1 m, las hojas son blandas y pequeñas. Se presenta especies de tallos suculentos cubren 1-5 por ciento de la superficie, con una altura entre los 0,5 y 2 metros, las hojas pueden ser suculentas o esclerófilas, de tamaño mediano a grande. Fórmula: B2bws2bh H2cw L1aws K3bki3ah. Según el Danserograma (ver Anexo 12): Presenta especies arbustivas de cobertura escasa, de tamaño medio (0,5-2 m), las hojas son perennes o semideciduo y de tamaño mediano. Las hierbas presentan cobertura desde muy escasa a continua, son de tamaño bajo-medio (menos de 0,5-2 m), de hojas perennes, de tamaño mediano y en ocasiones presenta hojas compuestas; y de textura membranosa. Las especies identificadas fueron: *Agave sp.*, *Bidens sp.* y *Lupinus sp.*



Figura 24. Ubicación del punto de muestreo M1

Parcela M2: No se tomó registro la altitud de la parcela. Formación vegetal: Pradera-Matorral (ver Figura 25). Según la matriz de Küchler (ver Anexo 11): La vegetación presente es latifoliada, o maleza, cubre más del 75 por ciento de la superficie, de una altura de hasta 0,5 m, las hojas son blandas y pequeñas. Hay una especie arbustiva que cubre entre 1-5 por ciento de la superficie, de una altura entre los 0,5-2 m, de hojas perennes y blandas. Los brioides cubre entre el 50-75 por ciento de la superficie, tienen una altura máxima de 0,1 m, las hojas son blandas y pequeñas. Se presenta especies de tallo succulento, cubre una superficie menos al 1 por ciento, de una altura entre los 0,5 a 2 m y las hojas son suculentas. Y el suelo cubre menos del 1 por ciento de la superficie. Fórmula: B3bw H2cws L1iws K3ak. Según el Danserograma (ver Anexo 12): Las especies arbustivas se presentan en grupos, son de tamaño medio (0,5-2 m), las hojas son medianos y perennes y la textura es membranosa. Las hierbas presentan una cobertura que va de discontinua a continua son de tamaño bajo (máx. 50 cm), las hojas son perenes y se pueden presentar simples y mediano, compuestas o circular; y la textura es membranosa. Las especies identificadas fueron: *Agave sp.*, *Bidens sp* y *Austrocyllindropuntia subulata* (Muehlenpf.) Backeb.



Figura 25. Ubicación del punto de muestreo M2

Parcela C2: Se encuentra a una altitud de 3338 msnm. Formación vegetal: Pradera-Césped (ver Figura 26). Según la matriz de Küchler (ver Anexo 11): La vegetación presente es latifoliada, o maleza, cubre más del 75 por ciento de la superficie, de una altura de hasta 0,5 m y las hojas son blandas. Los brioides cubren menos del 1 por ciento de la superficie, tienen una altura máxima de 0,1 m, son hojas blandas y pequeñas. Se presenta especies de tallo suculento cubre una superficie menos al 1 por ciento, de una altura entre los 0,5 a 2 m, las hojas son suculentas y grandes. Fórmula: H2cw1cw L1aw K3akl. Según el Danserograma (ver Anexo 12): Las hierbas presentan cobertura en grupo o continua, son de tamaño medio-bajo (hasta los 2 m), las hojas son perennes, de tamaño medio, pueden ser simples o gramínoideas, y son de textura membranosa. Para las especies brioides, su presencia es muy escasa, son de tamaño medio (0,5-2 m), las hojas son perennes y anchas; y de textura suculenta. Las especies identificadas fueron: *Agave sp.*, *Bidens sp.* y *Trifolium sp.*



Figura 26. Ubicación del punto de muestreo C2

Parcela Max 1: No se registró en campo la altitud exacta de la parcela. La altitud aproximada es de 3300 msnm. Formación vegetal: Matorral herbáceo (ver Figura 27). Según la matriz de Küchler (ver Anexo 11): La vegetación predominante es graminoide, cubre entre 25-50 por ciento de la superficie, es de una altura de 0,5-2 y las hojas son blandas o esclerófilas y grandes. La vegetación latifoliada, o maleza, cubre más del 50-75 por ciento de la superficie y presenta hojas blandas. Fórmula: G3phl2pwl H3iw. Según el Danserograma (ver Anexo 12): la vegetación presenta es herbácea, la cobertura es continua, de una altura medio (0,5-2 m), las hojas son perennes, pueden ser graminoideas o simples, y de textura membranosa. Las especies identificadas fueron: *Bidens sp.*, *Trifolium sp.*, *Lupinus sp.* y *Poa sp.*



Figura 27. Ubicación del punto de muestreo Max1

En el Anexo 13 se incluye el perfil altitudinal de la vegetación para la zona de estudio.

4.3 Selección de la parcela óptima

Durante el tiempo de estudio se realizó 8 repeticiones para cada uno de los tamaños de la parcela cosechada. En la Figura 28 se presenta un resumen del diagrama de cajas de los pesos secos para cada zona de estudio. Se puede observar en la Figura 28 el diagrama de cajas para las tres dimensiones de la parcela de cosecha, se presentaron valores atípicos para el la dimensión de 2 m² de orientación horizontal. Por los valores correspondientes para los puntos de muestreo “C2” y “Max_1” fueron eliminados; y se volvió a correr la sentencia en el *software* R. En la Figura 28 se observa que la dimensión que presenta una menor variación es la parcela de 2 m², por lo cual se puede presumir que esta dimensión puede ser considerado como parcela de cosecha óptima al presentar una mejor simetría en la distribución de los datos con respecto a los otros tamaños de parcela de orientación

horizontal. Sin embargo, se debe aplicar el método de la máxima curvatura para la confirmación. En la Figura 28 se presenta el diagrama de cajas para la parcela de 2 m².

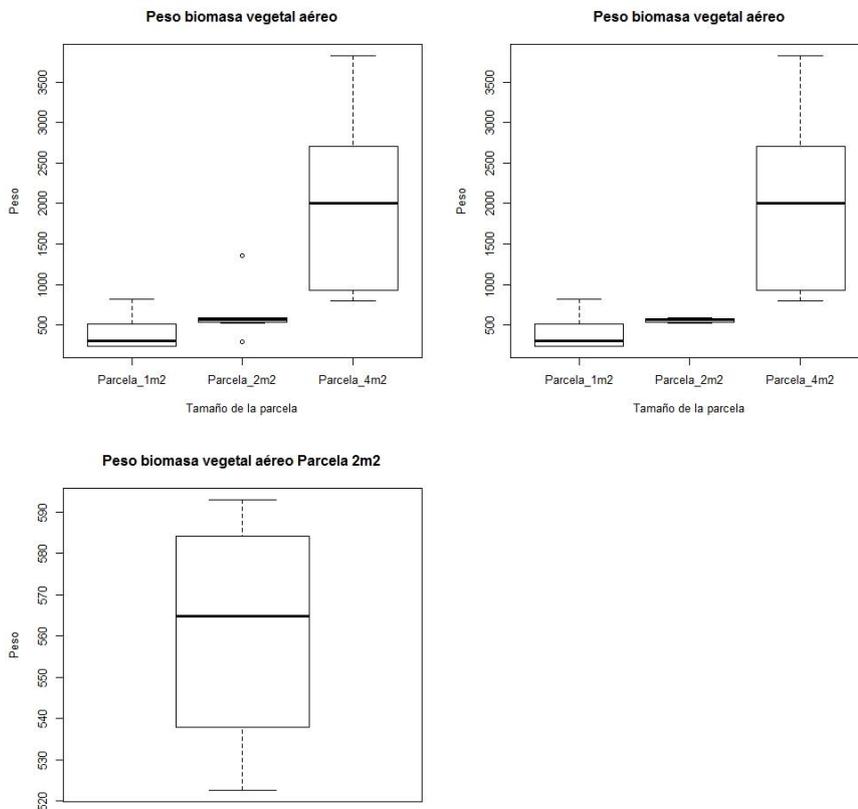


Figura 28. Diagrama de cajas y bigotes.

En la Figura 29 se presenta la gráfica de dispersión del método de la máxima curvatura. En el eje de las abscisas se ubica los tres tamaños, en orientación horizontal, de las parcelas de cosecha y en el eje de las ordenadas están ubicadas los correspondientes valores de los coeficientes de variación (CV) calculados anteriormente. El gráfico tiene un comportamiento de la curva de tipo “C”, es decir, de forma contraintuitiva la curva no presenta un patrón típico decreciente, o de tipo “J” invertida, que es lo mismo decir, según aumenta el tamaño de la parcela de cosecha disminuye el coeficiente de variación. En cambio, cumple el patrón decreciente en el primer segmento de la curva, entre la dimensión 1 m² y 2 m², y en el segundo segmento, de 2 m² y 4 m², es de forma creciente. Esto puede deberse que en el caso de los 4m² se ha tomado mayor material vegetal heterogéneo que haya alternado la composición relativamente similar entre las dimensiones de 1 m² y 2 m². En la gráfica se identifica la dimensión de 2 m² como el tamaño de parcela óptimo al ser el punto de máxima curvatura. En la Tabla 7 se presenta los valores de la gráfica de coeficiente de variación y tamaño de parcela de orientación horizontal.

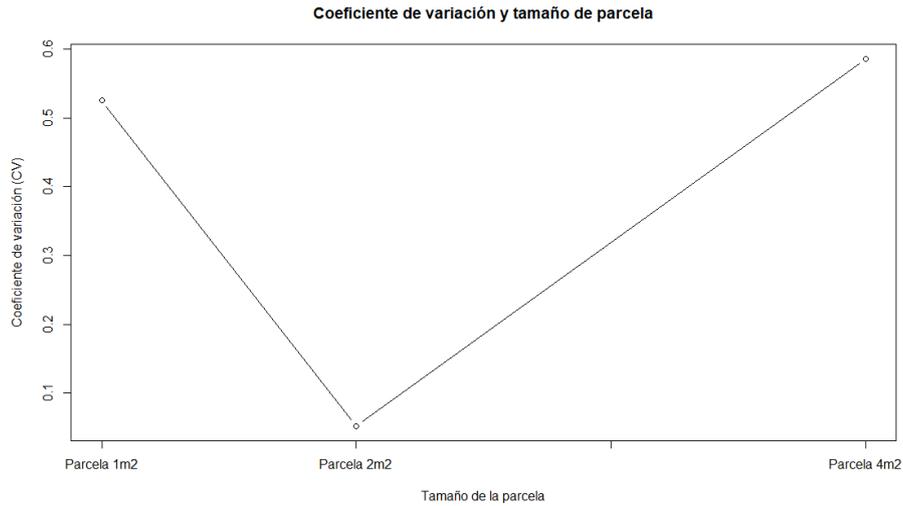


Figura 29. Coeficiente de variación y tamaño de parcela de orientación horizontal

Tabla 7: Valores de la gráfica de coeficiente de variación y tamaño de parcela

Tamaño de la parcela	CV%
1 m2	52.53%
2 m2	5.22%
4 m2	58.58%

En la Tabla 8 se presenta un resumen de los estadísticos descriptivos del peso seco (g MSV/m²) de la biomasa vegetal aéreo para la parcela de 2m². En la Figura 30 se observa el histograma del peso de la biomasa vegetal aéreo para la parcela de 2m² y en la Figura 30 se presenta el diagrama de densidad del Kernel para el peso de la biomasa vegetal aéreo para la parcela de 2m².

Tabla 8: Estadísticos descriptivos de los pesos secos (g MSV/m²) para la parcela 2m²

Descriptivos	
Media	280.585
Mediana	282,4
Mínimo	261,3
Máximo	296,5
1er. Cuartil	269,98
3er. Cuartil	291,96
Longitud	6
Varianza	21,45
Desviación estandar	14,65
Rango	Min. 261,29
	Max. 296,51
Diferencia de los extremos del rango	35,23
IQR	21,98

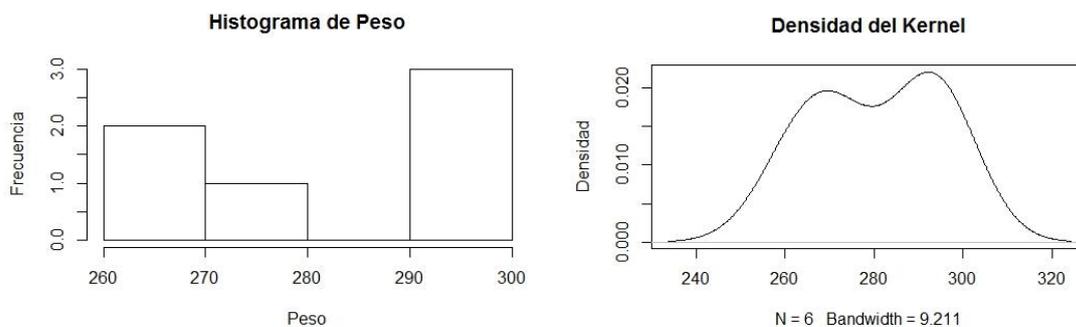


Figura 30. Histograma y Densidad del Kernel

4.4 Análisis espacial de los datos de biomasa

El análisis exploratorio resultó en un reporte de autocorrelación espacial global (ver Figura 31), se puede observar que el resultado del índice I de Moran es 0,193011, un z de 0.601078 y un p-valor igual a 0,5478. Al ser el índice I de Moran cercano a cero, el z entre los rangos -1,96 y 1,96, además de un p-valor mayor a 0,05, con lo cual se puede afirmar que no se rechaza la hipótesis nula, en consecuencia, el patrón no parece ser significativamente diferente al aleatorio. Según Cliff y Ord (1981) esto puede deberse a la poca consistencia de los datos para poder formar patrones espaciales y fue amplificado por no tener los suficientes puntos de muestro (Iriondo et al., 2008).

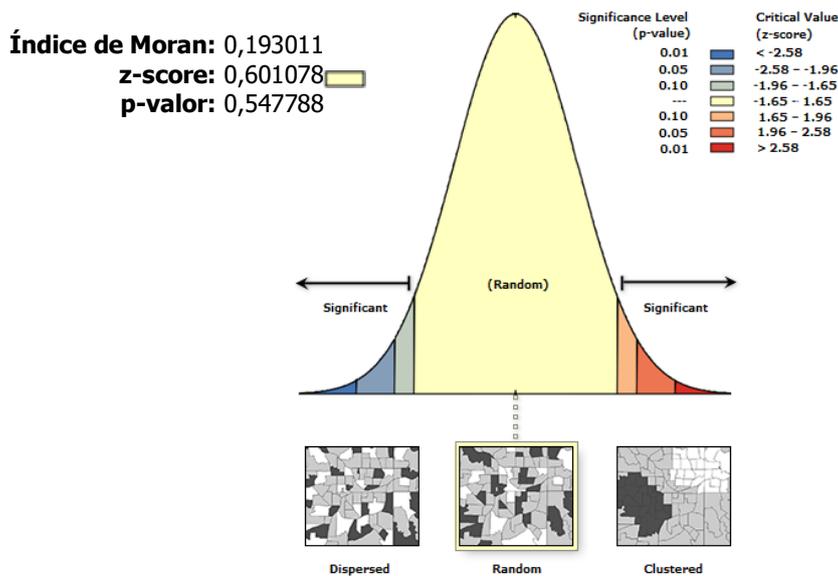


Figura 31. Reporte de autocorrelación espacial para el índice I de Moran

La interpretación del reporte del semivariograma (ver Figura 32 y Figura 33) se realizó siguiendo las recomendaciones de (Gallardo & Maestre, 2008). Presenta un *partial sill* o meseta (coincide con la varianza de la población o gráficamente es el valor al que el modelo se aplana primero) de 190,93, el *range* o rango (distancia donde las muestras empiezan a presentar independencia espacial o gráficamente es la distancia a la que el modelo se aplana por primera vez) de 4280,42, al ser alto se puede afirmar que existe una dependencia espacial de los datos; el *nugget* o pepita (varianza no explicada o gráficamente es el valor al que el semivariograma más próximo a interceptar con el eje Y) de 138,59; y la varianza estructural de 52,34. Al tener la pepita diferente de cero, se puede afirmar que se presenta errores en el modelo de predicción, así como posiblemente parte de los errores se generaron por el muestreo. Además, la proporción de la varianza explicada por el espacio representa el 27,42 por ciento, por lo cual se puede afirmar que el modelo representa de forma imprecisa la realidad, por lo tanto, el modelo de predicción es de baja precisión espacialmente.

Es isotrópico o, que es lo mismo, no presenta anisotropía, es decir, la correlación de los datos no depende de la dirección u orientación en la que esta se calcula, por lo que solo presenta un comportamiento (Gallardo & Maestre, 2008). Con los resultados anteriores se puede afirmar que la biomasa vegetal aérea no depende de la orientación.

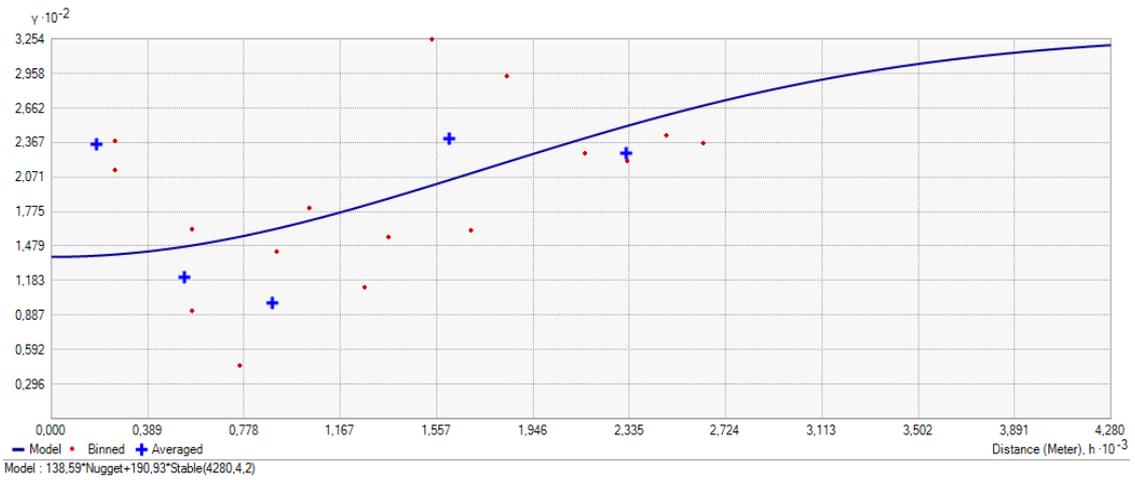


Figura 32. Semivariograma

Measured	Predicted	Error	Standard Error	Standardized Error	Normal Value
296.51	286.87081241...	-9.63918758194...	14.28492064588...	-0.67478061803...	-0.6744897493823807
292.054	288.90726998...	-3.14673001707...	14.25109408932...	-0.22080620599...	-0.21042839091738808
286.96	285.62106109...	-1.33893890906...	13.37986843467...	-0.10007115657...	0.21042839091738808
273.04	279.25734669...	6.217346691997...	14.71073020912...	0.422640249913...	0.6744897493823807
291.66	275.51536209...	-16.1446379096...	13.49498052606...	-1.19634392050...	-1.3829941280257012
261.285	284.98501881...	23.70001881473...	13.49532088526...	1.756165638166...	1.3829941280257012

Figura 33. Estadísticos del semivariograma

Al cumplirse todas las hipótesis anteriormente descritas, se puede afirmar que existe una estructura de autocorrelación con los datos de biomasa vegetal aérea. Por lo cual se puede aplicar el modelo de predicción Kriging ordinario, a pesar que es baja su fiabilidad a la realidad. Por lo cual los resultados son referenciales y servirán como guía para los análisis posteriores. En la Figura 34 se presenta los resultados.

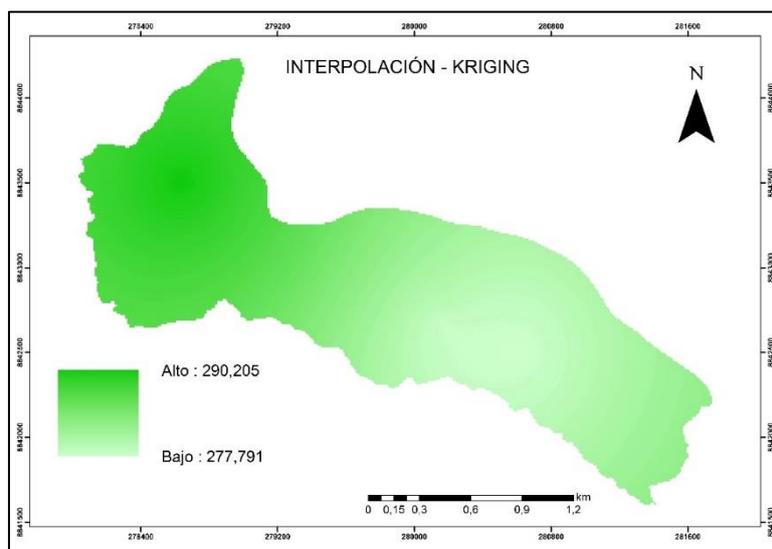


Figura 34. Modelo de interpolación de Kriging

4.5 Cálculo de los índices de vegetación

a) Índice de vegetación de diferencia normalizada (NDVI)

Se escogió este índice por las respuestas características y claramente definidas que son registradas por el sensor debido a los pigmentos y estructura celular de la vegetación. Al basarse en la diferencia normalizada de reflectancia entre la región roja del espectro visible y la región infrarrojo cercano su rango comprende entre -1 y +1. Es el índice más ampliamente utilizado por la teledetección por ser práctico y sencillo en el cálculo matemático. El NDVI está correlacionado con la cobertura de la vegetación. También es capaz de distinguir cuerpos de agua y suelos desnudos. El rango común para la vegetación es de 0.2 a 0.8 (Gilbert et al., 1997; Ónodi et al., 2017; Rouse et al., 1973; Tucker & Sellers, 1986). Sin embargo, al partir de un determinado estadio de desarrollo de la vegetación el índice se satura haciéndose insensible a pesar del aumento de la biomasa o densidad del dosel (Fonseca, 2004).

Para un mejor análisis de los resultados se debe tomar en cuenta el rango para la zona de estudio (ver Figura 35). Para SENTINEL-2 el valor mínimo es de 0,0242 y máximo es de 0,8838, valores típicos y que corresponden a la realidad de la zona de estudio al no detectar presencia de cuerpos de agua profundo ni nieve, así como zonas de suelo desnudos extensos. Para SPOT 7 el valor mínimo es de 0,003044462 y máximo es de 0,9058253, valores típicos, aunque elevados pudiéndose haberse saturado, y que corresponden a la realidad de la zona de estudio al no detectar presencia de cuerpos de agua profundo ni nieve, así como zonas de suelo desnudos extensos. Para SPOT 1,8 el valor mínimo es de 0,0651176 y máximo es de 0,6104652, valores típicos y que corresponden a la realidad de la zona de estudio al no detectar presencia de cuerpos de agua profundo ni nieve, así como zonas de suelo desnudos extensos. Para LANDSAT 8 a 30 m de resolución el valor mínimo es de 0,09327956 y máximo es de 0,9452042, valores típicos, aunque elevados pudiéndose haberse saturado, y que corresponden a la realidad de la zona de estudio al no detectar presencia de cuerpos de agua profundo ni nieve, así como zonas de suelo desnudos extensos. Para LANDSAT 8 a 15 m de resolución el valor mínimo es de -1 y máximo es de 0,9955646, son valores atípicos, elevados pudiéndose haberse saturado, y que no corresponden a la realidad de la zona de estudio al presentar un falso positivo a la presencia de cuerpos de agua profundo o nieve, así como zonas de suelo desnudos extensos y zonas boscosas densos. Se debe tener en cuenta que una corrección atmosférica parcial o

completa pudo haber aumentado los valores del índice NDVI y adicionalmente aumentar el ruido del suelo, en comparación con los datos sin una corrección atmosférica, por lo cual se pudo correr el riesgo de caer en un error de sobrestimación, pudiendo incluso llegar a saturar los sensores, reduciendo drásticamente la validez de los resultados (Liu & Huete, 1995).

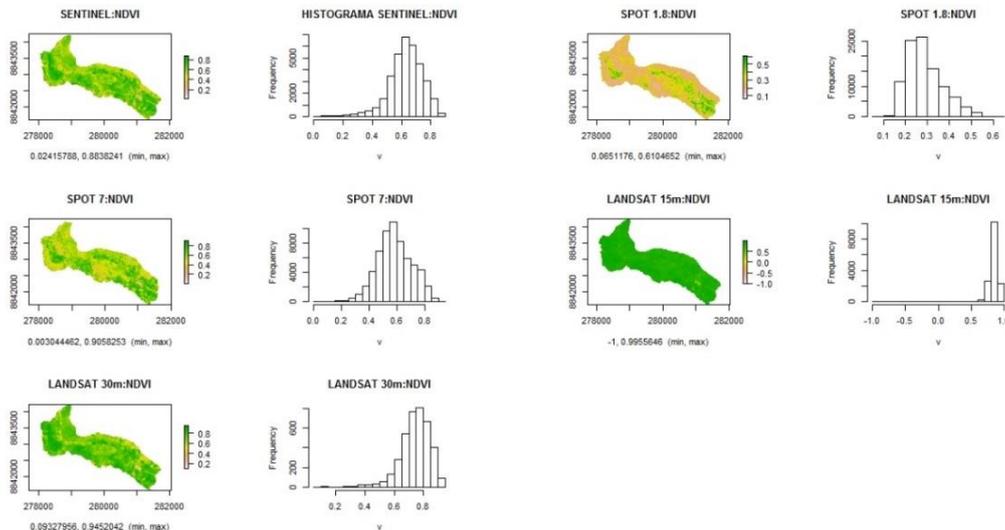


Figura 35. Mapa e histograma para el NDVI

b) Índice de Vegetación Resistente Atmosférica (ARVI)

Presenta una estructura similar al NDVI, sustituye la banda roja por rojo-azul. Usa los canales de rojo, infrarrojo cercano y azul para la corrección de los efectos atmosféricos, es decir, presenta una baja variación en sus valores al presentarse este fenómeno. Su estructura contempla la dispersión y absorción debido a los aerosoles atmosféricos, gases y vapor de agua, evitando la reducción de forma significativa los valores del índice. La adición de un parámetro de calibración atmosférica, γ , reduce los efectos atmosféricos, toma el valor de $\gamma = 1$ al no disponer de información sobre el tipo de aerosoles presentes en la atmosfera en el momento que se realiza el estudio (Kaufman y Tanre, 1992).

Para un mejor análisis de los resultados se debe tomar en cuenta el rango para la zona de estudio (ver Figura 36). Para SENTINEL-2 el valor mínimo es de -0,0858 y máximo es de 0,8018, valores típicos y que corresponden a la realidad de la zona de estudio al no detectar presencia de cuerpos de agua profundo ni nieve, así como zonas de suelo desnudos extensos. Para SPOT 7 el valor mínimo es de -0,1301145 y máximo es 0,8275297, valores típicos, aunque elevados pudiéndose haberse saturado, y que corresponden a la realidad de la zona de estudio al no detectar presencia de cuerpos de agua profundo ni

nieve, así como zonas de suelo desnudos extensos. Para SPOT 1,8 el valor mínimo es de -0,06018918 y máximo es de 0,4200981, valores atípicos al presentar un rango bajo y que corresponden a la realidad de la zona de estudio. No detectar presencia de cuerpos de agua profundo ni nieve, así como zonas de suelo desnudos extensos. Para LANDSAT 8 a 30 m de resolución el valor mínimo es de -0,05974357 y máximo es de 0,8954284, valores típicos, aunque elevados pudiéndose haberse saturado, y que corresponden a la realidad de la zona de estudio al no detectar presencia de cuerpos de agua profundo ni nieve, así como zonas de suelo desnudos extensos. Para LANDSAT 8 a 15 m de resolución el valor mínimo es de -0,4049839 y máximo es de 0,9913049, son valores atípicos, elevados pudiéndose haberse saturado, y que no corresponden a la realidad de la zona de estudio al presentar un falso positivo a la presencia zonas boscosas densos.

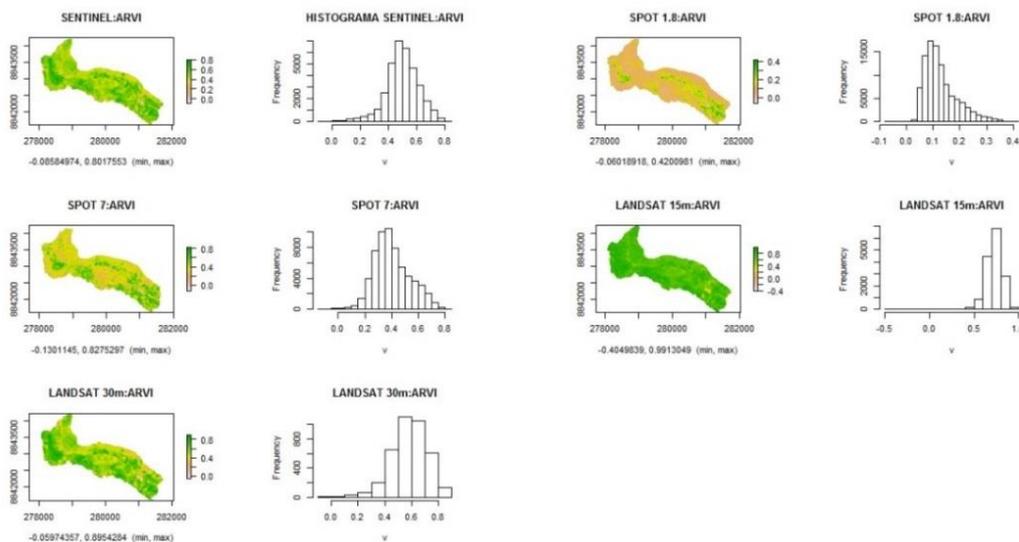


Figura 36. Mapa e histograma para el ARVI

c) Índice de vegetación ajustada por humedad (MAVI)

El índice MAVI se presenta como una relación de las reflectancias entre las bandas rojo, infrarrojo cercano e infrarrojo de onda corta (SWIR) (G. Zhu et al., 2014). Para G. Zhu et al. (2014) la banda SWIR presenta una sensibilidad al contenido del agua en el dosel de la vegetación. Para Schmidt & Karnieli (2001) la banda SWIR es capaz de penetrar la columna atmosférica sin presentar distorsión por lo cual no es necesario la adición de constantes en la estructura del índice para una corrección atmosférica. El índice MAVI presenta una ventaja de su uso en zonas montañosas al tomar proporciones entre diferentes bandas con el fin de reducir el ruido causado por la topografía (G. Zhu et al., 2014).

Para un mejor análisis de los resultados se debe tomar en cuenta el rango para la zona de

estudio (ver Figura 37). Para SENTINEL-2 el valor mínimo es de 0,0209 y máximo es de 0,7080, valores típicos y que corresponden a la realidad de la zona de estudio al no detectar presencia de cuerpos de agua profundo ni nieve, así como zonas de suelo desnudos extensos. Para LANDSAT 8 a 30 m de resolución el valor mínimo es de 0,05752777 y máximo es de 0,7673522, valores típicos y que corresponden a la realidad de la zona de estudio al no detectar presencia de cuerpos de agua profundo ni nieve, así como zonas de suelo desnudos extensos. Para LANDSAT 8 a 15 m de resolución el valor mínimo es de -0,3243121 y máximo es de 0,8279184, son valores atípicos, bajos pudiéndose haberse saturado, y que no corresponden a la realidad de la zona de estudio al presentar un falso positivo a la presencia de, zonas de suelo desnudos extensos o cuerpos de agua extensos.

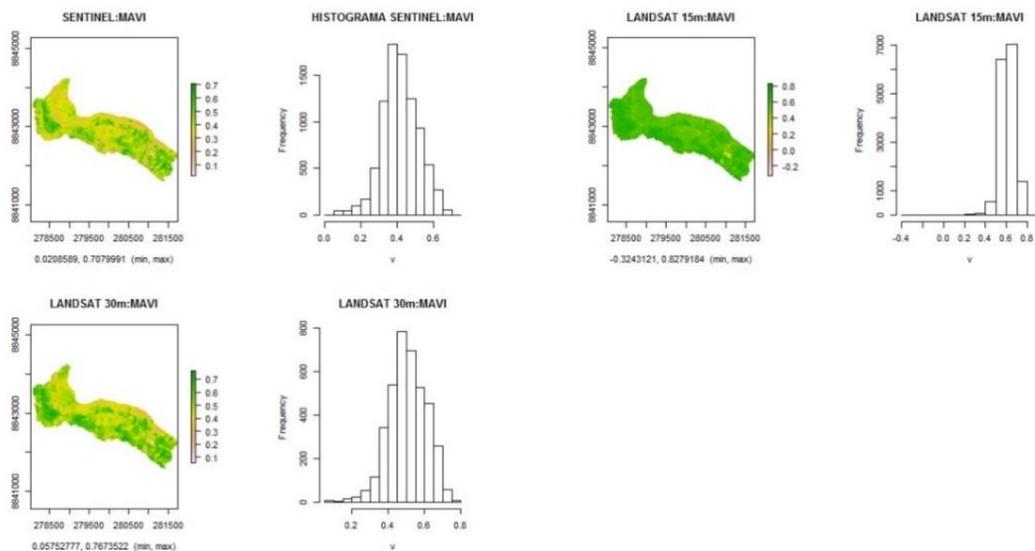


Figura 37. Mapa e histograma para el MAVI

d) Índice de Vegetación Ajustada al Suelo (SAVI)

Este índice permite la casi eliminación de las variaciones por efecto del suelo en superficies parcialmente cubiertas comparación de otros índices de vegetación, se le adiciona un multiplicador $L+1$ para corregir la limitación del rango del NDVI y se usó $L=0.5$ al presentar la zona de estudio una intermedia la densidad vegetal. El índice SAVI puede contribuir en el establecimiento de modelos para la descripción de ecosistemas dinámicos de suelo-vegetación (Baret & Guyot, 1991; Huete, 1988).

Para un mejor análisis de los resultados se debe tomar en cuenta el rango para la zona de estudio (ver Figura 38). Para SENTINEL-2 el valor mínimo es de 0,0362 y máximo es de 1,3256, valores típicos y que corresponden a la realidad de la zona de estudio al no detectar presencia de cuerpos de agua profundo ni nieve, así como zonas de suelo desnudos

extensos. Para SPOT 7 el valor mínimo es de 0,000761487 y máximo es 0,655295, valores típicos y que corresponden a la realidad de la zona de estudio al no detectar presencia de cuerpos de agua profundo ni nieve, así como zonas de suelo desnudos extensos. Para SPOT 1,8 el valor mínimo es de 0,07515381 y máximo es de 0,5563589, valores típicos y que corresponden a la realidad de la zona de estudio al no detectar presencia de cuerpos de agua profundo ni nieve, así como zonas de suelo desnudos extensos. Para LANDSAT 8 a 30 m de resolución el valor mínimo es de 0,0309788 y máximo es de 0,7197404, valores típicos y que corresponden a la realidad de la zona de estudio al no detectar presencia de cuerpos de agua profundo ni nieve, así como zonas de suelo desnudos extensos. Para LANDSAT 8 a 15 m de resolución el valor mínimo es de -0,1165043 y máximo es de 0,7786088, valores típicos y que corresponden a la realidad de la zona de estudio al no detectar presencia de cuerpos de agua profundo ni nieve, así como zonas de suelo desnudos extensos.

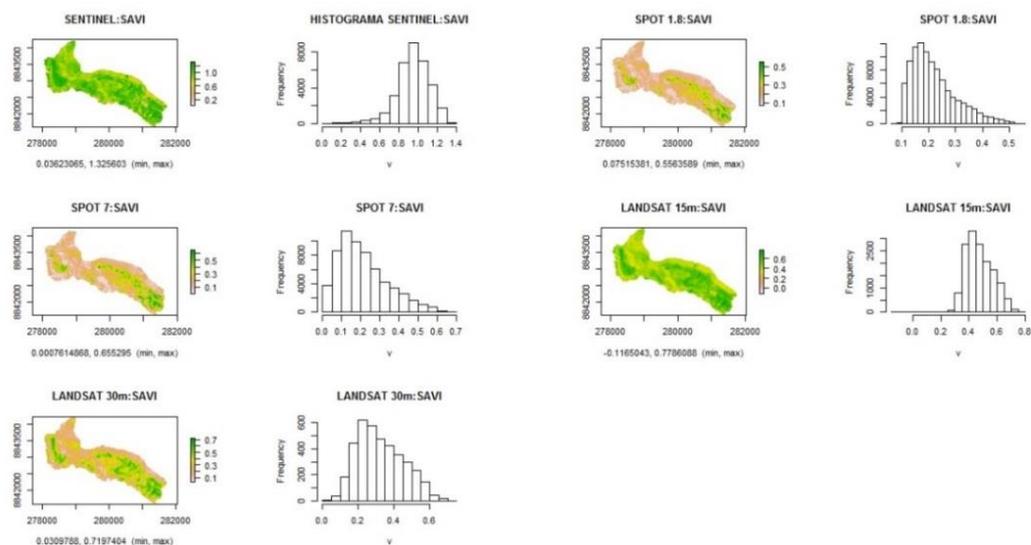


Figura 38. Mapa e histograma para el SAVI

e) Optimización del índice de vegetación ajustada por el suelo (OSAVI)

Este índice usa la constante X, debido a que no es necesario tener un conocimiento previo del tipo de suelo para realizar la corrección. Con un valor de $X=0,16$ se minimiza la desviación estándar en todo el rango de la cobertura vegetal, en general presenta un buen comportamiento para una cobertura vegetal superior al 50 por ciento (Rondeaux et al., 1996).

Para un mejor análisis de los resultados se debe tomar en cuenta el rango para la zona de estudio (ver Figura 39). Para SENTINEL-2 el valor mínimo es 0,0242 y máximo es de

0,8838, valores típicos y que corresponden a la realidad de la zona de estudio al no detectar presencia de cuerpos de agua profundo ni nieve, así como zonas de suelo desnudos extensos. Para SPOT 7 el valor mínimo es de 0,001171369 y máximo es 0,6725016, valores típicos y que corresponden a la realidad de la zona de estudio al no detectar presencia de cuerpos de agua profundo ni nieve, así como zonas de suelo desnudos extensos. Para SPOT 1,8 el valor mínimo es de 0,06015357 y máximo es de 0,5059046, valores típicos, pero con un rango reducido, y corresponde parcialmente a la realidad de la zona de estudio al no detectar presencia de cuerpos de agua profundo ni nieve, así como zonas de suelo desnudos extensos, así como tampoco matorrales densos que son típicos de la zona. Para LANDSAT 8 a 30 m de resolución el valor mínimo es de 0,06064194 y máximo es de 0,7213298, valores típicos y que corresponden a la realidad de la zona de estudio al no detectar presencia de cuerpos de agua profundo ni nieve, así como zonas de suelo desnudos extensos. Para LANDSAT 8 a 15 m de resolución el valor mínimo es de -0,1870972 y máximo es de 0,7509832, valores típicos y que corresponden a la realidad de la zona de estudio al no detectar presencia de cuerpos de agua profundo ni nieve, así como zonas de suelo desnudos extensos.

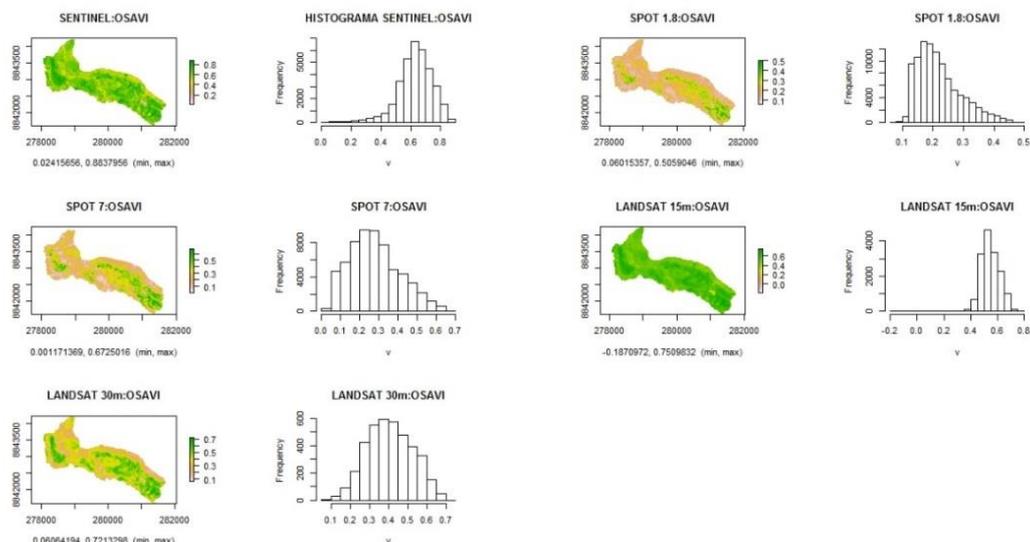


Figura 39. Mapa e histograma para el OSaVI

f) Índice de vegetación ajustado por el suelo y resistente atmosféricamente (SARVI)

El índice SARVI es una modificación del índice ARVI. Fue propuesto con el fin de hacer una corrección para el ruido del suelo generado por las propiedades ópticas del suelo, pudiendo minimizar la reflectancia y dispersión del suelo de forma significativa, obteniendo un resultado más estable. Se incluye una constante L, generalmente toma el valor

de $L=0,5$ (Huete, 1988; Huete et al., 1997; Kaufman & Tanré, 1992; Liu & Huete, 1995).

Para un mejor análisis de los resultados se debe tomar en cuenta el rango para la zona de estudio (ver Figura 40). Para SENTINEL-2 el valor mínimo es $-0,1288$ y máximo es de $1,2025$, valores típicos y que corresponden a la realidad de la zona de estudio al no detectar presencia de cuerpos de agua profundo ni nieve, así como zonas de suelo desnudos extensos. Para SPOT 7 el valor mínimo es de $-0,1180285$ y máximo es $0,6228218$, valores típicos y que corresponden a la realidad de la zona de estudio al no detectar presencia de cuerpos de agua profundo ni nieve, así como zonas de suelo desnudos extensos. Para SPOT 1,8 el valor mínimo es de $-0,06557227$ y máximo es de $0,4255569$, valores típicos, pero con un rango reducido, y corresponde parcialmente a la realidad de la zona de estudio al no detectar presencia de cuerpos de agua profundo ni nieve, así como zonas de suelo desnudos extensos, así como tampoco matorrales densos que son típicos de la zona. Para LANDSAT 8 a 30 m de resolución el valor mínimo es de $-0,05645944$ y máximo es de $0,6975703$, valores típicos y que corresponden a la realidad de la zona de estudio al no detectar presencia de cuerpos de agua profundo ni nieve, así como zonas de suelo desnudos extensos. Para LANDSAT 8 a 15 m de resolución el valor mínimo es de $-0,1229578$ y máximo es de $0,7562912$, valores típicos y que corresponden a la realidad de la zona de estudio al no detectar presencia de cuerpos de agua profundo ni nieve, así como zonas de suelo desnudos extensos.

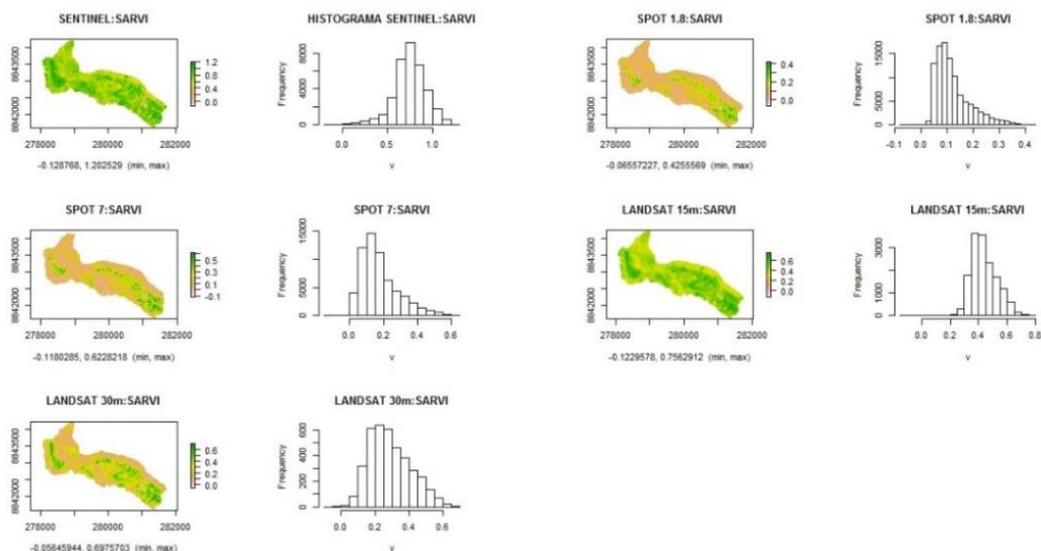


Figura 40. Mapa e histograma para el SARVI

g) Índice de Vegetación Mejorada (EVI)

El EVI es un bucle cerrado o de retroalimentación, se tomó como criterios para su formulación el bucle de retroalimentación del ruido atmosférico y del suelo, y un bucle de compensación del ruido atmosférico (Liu & Huete, 1995). En la fórmula de EVI se agregó el factor L, es el factor de ajuste de las distorsiones del suelo, siendo además muy sensible a las condiciones topográficas de la zona de estudio, es especial si se encuentra en una región montañosa (Matsushita et al., 2007). El EVI es un índice idóneo para el monitoreo de la vegetación, al tener una mejor detección en regiones de alta densidad de biomasa, sin llegar a una saturación de los valores del índice evitando así desestimar o sobreestimar la biomasa presente. Esto debido a su capacidad de reducir de las distorsiones atmosféricas, efectos del suelo y dosel vegetal (Huete et al., 1997; Matsushita et al., 2007).

Para un mejor análisis de los resultados se debe tomar en cuenta el rango para la zona de estudio (ver Figura 41). No hubo resultados para SENTINEL-2 debido a problemas técnicos para calcular el índice. Para SPOT 7 el valor mínimo es de 0.0006811071 y máximo es 0.738811, valores típicos y que corresponden a la realidad de la zona de estudio al no detectar presencia de cuerpos de agua profundo ni nieve, así como zonas de suelo desnudos extensos. Para SPOT 1,8 el valor mínimo es de 0.09323498 y máximo es de 0.7165008, valores típicos, valores típicos y que corresponden a la realidad de la zona de estudio al no detectar presencia de cuerpos de agua profundo ni nieve, así como zonas de suelo desnudos extensos. Para LANDSAT 8 a 30 m de resolución el valor mínimo es de 0.02742501 y máximo es de 0.8086402, valores típicos y que corresponden a la realidad de la zona de estudio al no detectar presencia de cuerpos de agua profundo ni nieve, así como zonas de suelo desnudos extensos. Para LANDSAT 8 a 15 m de resolución el valor mínimo es de -0.1114922 y máximo es de 0.9003353, valores típicos y que corresponden a la realidad de la zona de estudio al no detectar presencia de cuerpos de agua profundo ni nieve, así como zonas de suelo desnudos extensos.

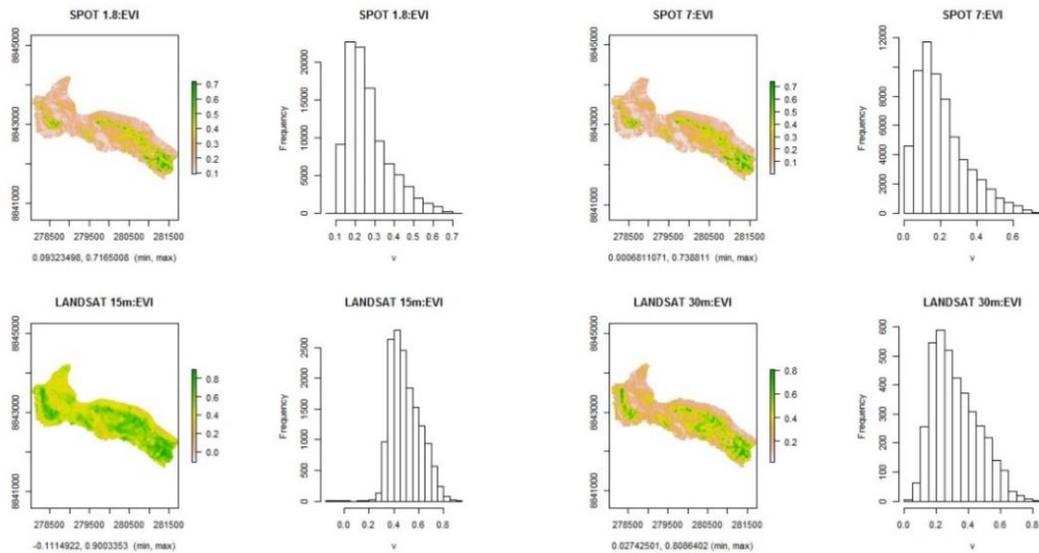


Figura 41. Mapa e histograma para EVI

4.6 Modelo de estimación de la biomasa vegetal aérea por índices de vegetación

a) Prueba de normalidad de Shapiro-Wilk

En la Tabla 9, el peso de la biomasa tiene un p-valor de 0,2839, por lo cual no se rechaza la hipótesis nula, es decir, presenta una distribución normal por lo cual el coeficiente de Pearson es el adecuado para estos datos.

Tabla 9: Prueba de normalidad de Shapiro-Wilk para el peso seco de la biomasa

Prueba de normalidad Shapiro-Wilk		
	W	p-valor
Peso	0,88316	0,2839

En la Tabla 10, el índice NDVI para LANDSAT-8 a una resolución de 30 m tiene un p-valor de 0,5587, por lo cual no se rechaza la hipótesis nula, es decir, presenta una distribución normal por lo cual el coeficiente de Pearson es el adecuado para estos datos. En la Tabla 10, el índice NDVI para LANDSAT-8 a una resolución de 15 m tiene un p-valor de 0,1865, por lo cual no se rechaza la hipótesis nula, es decir, presenta una distribución normal por lo cual el coeficiente de Pearson es el adecuado para estos datos. En la Tabla 10, el índice NDVI para SENTINEL tiene un p-valor de 0,262, por lo cual no se rechaza la hipótesis nula, es decir, presenta una distribución normal por lo cual el coeficiente de Pearson es el adecuado para estos datos. En la Tabla 10, el índice NDVI para SPOT a una resolución de 1,8m tiene un p-valor de 0,6597, por lo cual no se rechaza la hipótesis nula,

es decir, presenta una distribución normal por lo cual el coeficiente de Pearson es el adecuado para estos datos. En la Tabla 10, el índice NDVI para SPOT a una resolución de 7m tiene un p-valor de 0,9934, por lo cual no se rechaza la hipótesis nula, es decir, presenta una distribución normal por lo cual el coeficiente de Pearson es el adecuado para estos datos.

Tabla 10: Prueba de normalidad de Shapiro-Wilk para índice NDVI

Prueba de normalidad Shapiro-Wilk		
	W	p-valor
NDVI_L30	0,92721	0,5587
NDVI_L15	0,85922	0,1865
NDVI_S	0,87844	0,262
NDVI_SP1	0,94006	0,6597
NDVI_SP7	0,99194	0,9934

En la Tabla 11, el índice ARVI para LANDSAT-8 a una resolución de 30 m tiene un p-valor de 0,4418, por lo cual no se rechaza la hipótesis nula, es decir, presenta una distribución normal por lo cual el coeficiente de Pearson es el adecuado para estos datos. En la Tabla 11, el índice ARVI para LANDSAT-8 a una resolución de 15 m tiene un p-valor de 0,1628, por lo cual no se rechaza la hipótesis nula, es decir, presenta una distribución normal por lo cual el coeficiente de Pearson es el adecuado para estos datos. En la Tabla 11, el índice ARVI para SENTINEL tiene un p-valor de 0,463, por lo cual no se rechaza la hipótesis nula, es decir, presenta una distribución normal por lo cual el coeficiente de Pearson es el adecuado para estos datos. En la Tabla 11, el índice ARVI para SPOT a una resolución de 1,8m tiene un p-valor de 0,9899, por lo cual no se rechaza la hipótesis nula, es decir, presenta una distribución normal por lo cual el coeficiente de Pearson es el adecuado para estos datos. En la Tabla 11, el índice ARVI para SPOT a una resolución de 7 m tiene un p-valor de 0,9742, por lo cual no se rechaza la hipótesis nula, es decir, presenta una distribución normal por lo cual el coeficiente de Pearson es el adecuado para estos datos.

Tabla 11: Prueba de normalidad de Shapiro-Wilk para índice ARVI

Prueba de normalidad Shapiro-Wilk		
	W	p-valor
ARVI_L30	0,91082	0,4418
ARVI_L15	0,85183	0,1628
ARVI_S	0,91397	0,463
ARVI_SP1	0,99031	0,9899
ARVI_SP7	0,98518	0,9742

En la Tabla 12, el índice MAVI para LANDSAT-8 a una resolución de 30 m tiene un p-valor de 0,02395, por lo cual se rechaza la hipótesis nula, es decir, no presenta una distribución normal por lo cual el coeficiente de Pearson no es el adecuado para estos datos y se usaran los coeficientes de Sperman y Kendall. En la Tabla 12, el índice MAVI para LANDSAT-8 a una resolución de 15 m tiene un p-valor de 0,01089, por lo cual se rechaza la hipótesis nula, es decir, no presenta una distribución normal por lo cual el coeficiente de Pearson no es el adecuado para estos datos y se usaran los coeficientes de Sperman y Kendall. En la Tabla 12, el índice MAVI para SENTINEL tiene un p-valor de 0,6866, por lo cual no se rechaza la hipótesis nula, es decir, presenta una distribución normal por lo cual el coeficiente de Pearson es el adecuado para estos datos.

Tabla 12: Prueba de normalidad de Shapiro-Wilk para índice MAVI

Prueba de normalidad Shapiro-Wilk		
	W	p-valor
MAVI_L30	0,75822	0,02395
MAVI_L15	0,72372	0,01089
MAVI_S	0,94339	0,6866

En la Tabla 13, el índice SAVI para LANDSAT-8 a una resolución de 30 m tiene un p-valor de 0,03213, por lo cual se rechaza la hipótesis nula, es decir, no presenta una distribución normal por lo cual el coeficiente de Pearson no es el adecuado para estos datos y se usaran los coeficientes de Sperman y Kendall. En la Tabla 13, el índice SAVI para LANDSAT-8 a una resolución de 15 m tiene un p-valor de 0,2198, por lo cual no se rechaza la hipótesis nula, es decir, presenta una distribución normal por lo cual el coeficiente de Pearson es el adecuado para estos datos. En la Tabla 13, el índice SAVI para SENTINEL tiene un p-valor de 0,3694, por lo cual no se rechaza la hipótesis nula, es decir, presenta una distribución normal por lo cual el coeficiente de Pearson es el adecuado para estos datos. En la Tabla 13, el índice SAVI para SPOT a una resolución de 1,8m tiene un p-valor de 0,8788, por lo cual no se rechaza la hipótesis nula, es decir, presenta una distribución normal por lo cual el coeficiente de Pearson es el adecuado para estos datos. En la Tabla 13, el índice SAVI para SPOT a una resolución de 7 m tiene un p-valor de 0,8989, por lo cual no se rechaza la hipótesis nula, es decir, presenta una distribución normal por lo cual el coeficiente de Pearson es el adecuado para estos datos.

Tabla 13: Prueba de normalidad de Shapiro-Wilk para índice SAVI

Prueba de normalidad Shapiro-Wilk		
	W	p-valor
SAVI_L30	0,77157	0,03213
SAVI_L15	0,86837	0,2198
SAVI_S	0,89923	0,3694
SAVI_SP1	0,968	0,8788
SAVI_SP7	0,97097	0,8989

En la Tabla 14, el índice SARVI para LANDSAT-8 a una resolución de 30 m tiene un p-valor de 0,07454, por lo cual no se rechaza la hipótesis nula, es decir, presenta una distribución normal por lo cual el coeficiente de Pearson es el adecuado para estos datos. En la Tabla 14, el índice SARVI para LANDSAT-8 a una resolución de 15 m tiene un p-valor de 0,1767, por lo cual no se rechaza la hipótesis nula, es decir, presenta una distribución normal por lo cual el coeficiente de Pearson es el adecuado para estos datos. En la Tabla 14, el índice SARVI para SENTINEL tiene un p-valor de 0,3154, por lo cual no se rechaza la hipótesis nula, es decir, presenta una distribución normal por lo cual el coeficiente de Pearson es el adecuado para estos datos. En la Tabla 14, el índice SARVI para SPOT a una resolución de 1,8m tiene un p-valor de 0,8921, por lo cual no se rechaza la hipótesis nula, es decir, presenta una distribución normal por lo cual el coeficiente de Pearson es el adecuado para estos datos. En la Tabla 14, el índice SARVI para SPOT a una resolución de 7 m tiene un p-valor de 0,655, por lo cual no se rechaza la hipótesis nula, es decir, presenta una distribución normal por lo cual el coeficiente de Pearson es el adecuado para estos datos.

Tabla 14: Prueba de normalidad de Shapiro-Wilk para índice SARVI

Prueba de normalidad Shapiro-Wilk		
	W	p-valor
SARVI_L30	0,8116	0,07454
SARVI_L15	0,85628	0,1767
SARVI_S	0,88947	0,3154
SARVI_SP1	0,96995	0,8921
SARVI_SP7	0,93948	0,655

En la Tabla 15, el índice OSAVI para LANDSAT-8 a una resolución de 30 m tiene un p-valor de 0,0494, por lo cual se rechaza la hipótesis nula, es decir, no presenta una distribución normal por lo cual el coeficiente de Pearson no es el adecuado para estos datos y se usaran los coeficientes de Sperman y Kendall. En la Tabla 15, el índice OSAVI para LANDSAT-8 a una resolución de 15 m tiene un p-valor de 0,1978, por lo cual no se

rechaza la hipótesis nula, es decir, presenta una distribución normal por lo cual el coeficiente de Pearson es el adecuado para estos datos. En la Tabla 15, el índice OSAVI para SENTINEL tiene un p-valor de 0,262, por lo cual no se rechaza la hipótesis nula, es decir, presenta una distribución normal por lo cual el coeficiente de Pearson es el adecuado para estos datos. En la Tabla 15, el índice OSAVI para SPOT a una resolución de 1,8 m tiene un p-valor de 0,9259, por lo cual no se rechaza la hipótesis nula, es decir, presenta una distribución normal por lo cual el coeficiente de Pearson es el adecuado para estos datos. En la Tabla 15, el índice OSAVI para SPOT a una resolución de 7 m tiene un p-valor de 0,4157, por lo cual no se rechaza la hipótesis nula, es decir, presenta una distribución normal por lo cual el coeficiente de Pearson es el adecuado para estos datos.

Tabla 15: Prueba de normalidad de Shapiro-Wilk para índice OSAVI

Prueba de normalidad Shapiro-Wilk		
	W	p-valor
OSAVI_L30	0,79168	0,0494
OSAVI_L15	0,86246	0,1978
OSAVI_S	0,87845	0,262
OSAVI_SP1	0,97529	0,9259
OSAVI_SP7	0,90681	0,4157

En la Tabla 16, el índice EVI para LANDSAT-8 a una resolución de 30 m tiene un p-valor de 0,02272, por lo cual se rechaza la hipótesis nula, es decir, no presenta una distribución normal por lo cual el coeficiente de Pearson no es el adecuado para estos datos y se usaran los coeficientes de Spearman y Kendall. En la Tabla 16, el índice EVI para LANDSAT-8 a una resolución de 15 m tiene un p-valor de 0,1033, por lo cual no se rechaza la hipótesis nula, es decir, presenta una distribución normal por lo cual el coeficiente de Pearson es el adecuado para estos datos. En la Tabla 16, el índice EVI para SPOT a una resolución de 1,8 m tiene un p-valor de 0,5698, por lo cual no se rechaza la hipótesis nula, es decir, presenta una distribución normal por lo cual el coeficiente de Pearson es el adecuado para estos datos. En la Tabla 16, el índice EVI para SPOT a una resolución de 7 m tiene un p-valor de 0,9723, por lo cual no se rechaza la hipótesis nula, es decir, presenta una distribución normal por lo cual el coeficiente de Pearson es el adecuado para estos datos.

Tabla 16: Prueba de normalidad de Shapiro-Wilk para índice EVI

Prueba de normalidad Shapiro-Wilk		
	W	p-valor
EVI_L30	0.75587	0.02272
EVI_L15	0.82799	0.1033
EVI_SP1	0.92866	0.5698
EVI_SP7	0.98468	0.9723

b) Análisis de correlación

El NDVI tiene una relevancia y aplicación para estudios sobre el estado de los campos agrícolas (Ónodi et al., 2017; Rodrigues et al., 2013; Tucker & Sellers, 1986). La principal desventaja del uso del NDVI es la interpretación de los resultados cuando la zona de estudio presenta una baja cobertura vegetal, en los cuales se encuentran influenciados por la reflectancia del suelo (Rondeaux et al., 1996). Los resultados indican que existe un bajo coeficiente de correlación entre el NDVI y la biomasa vegetal aérea (entre -0,022 y 0,201), es decir, dicha relación puede ser débil o nula (ve Tabla 17).

Tabla 17: Coeficientes de correlación entre peso e índice NDVI

Correlación de Pearson	
NDVI_L30	0,11475
NDVI_L15	-0,1692314
NDVI_S	-0,02282098
NDVI_SP1	-0,05172994
NDVI_SP7	0,201631

Si bien es cierto que el índice ARVI presenta una retroalimentación negativa para la reducción de los efectos atmosféricos, tiene como desventaja una retroalimentación positiva para el ruido o distorsión del suelo, con lo cual este punto se tomó en cuenta al momento del análisis de los resultados de este índice, teniendo la salvedad que no sería adecuado su uso en zonas con extensos parches de suelo de escasa o nula vegetación como las zonas áridas y semi-áridas, el cual no es el caso para la zona de estudio (Kaufman & Tanré, 1992; Liu & Huete, 1995). Kaufman & Tanré (1992) y Liu & Huete (1995). han reportado que los resultados de este índice son confiables y consistentes para en zonas de pastizales, forestales y agrícolas (alfalfa). Los resultados indican que existe un bajo coeficiente de correlación entre el ARVI y la biomasa vegetal aérea (entre -0,0604 y 0,1412), es decir, dicha relación puede ser débil o nula (ver Tabla 18).

Tabla 18: Coeficientes de correlación entre peso e índice ARVI

Correlación de Pearson	
ARVI_L30	0,1074333
ARVI_L15	-0,1705066
ARVI_S	-0,06048888
ARVI_SP1	0,05908778
ARVI_SP7	0,141201

El índice MAVI al expresarse como una relación de bandas puede minimizar las influencias del ruido y las perturbaciones provenientes de la topografía (G. Zhu et al., 2014). El principal factor que pudiera causar una alteración y disminuir la confianza en los resultados, es la humedad en el suelo, esto debido a la sensibilidad de la banda SWIR por el contenido de agua (G. Zhu et al., 2014). Si bien este índice toma en cuenta los efectos de iluminación, no se ha tenido en cuenta el ruido por efecto de las propiedades ópticas del suelo, además de no basarse en una ecuación de línea de suelo, ni tener en su estructura constantes de corrección del suelo, por lo anterior pudiera presentar una desventaja para zonas de baja vegetación y alta presencia de suelo desnudo, pudiendo disminuir la confianza en los resultados si se hubiera presentado este caso. Los resultados indican que existe un coeficiente de correlación entre el MAVI y la biomasa vegetal aérea entre -0,37 y 0,06, es decir, dicha relación puede ser media (ver Tabla 19).

Tabla 19: Coeficientes de correlación entre peso e índice MAVI

	Coeficiente de Correlación		
	Pearson	Sperman	Kendall
MAVI_L30		0,0857	0,0667
MAVI_L15		-0,3714	-0,2
MAVI_S	-0,3250037		

Las estimaciones realizadas con el índice SAVI de la cobertura vegetal se encuentran menos influenciado por las variaciones del brillo del suelo, ya que tiene una buena retroalimentación negativa del suelo, pero en contraste carece de retroalimentación negativa atmosférica (Gilabert et al. 2002; Liu y Huete, 1995; Rodríguez-Moreno y Bullock, 2013). Los resultados indican que existe un coeficiente de correlación entre el SAVI y la biomasa vegetal aérea entre -0,2571 y 0,3589 es decir, dicha relación puede ser media (ver Tabla 20).

Tabla 20: Coeficientes de correlación entre peso e índice SAVI

	Coeficiente de Correlación		
	Pearson	Sperman	Kendall
SAVI_L30		-0,2571	0,2
SAVI_L15	0,1083865		
SAVI_S	-0,05409887		
SAVI_SP1	0,03935004		
SAVI_SP7	0,3589664		

El índice SARVI se fundamenta en tener una retroalimentación negativa para las distorsiones del suelo y de la atmosfera, presenta un similar comportamiento con el índice ARVI en zonas de alta vegetación y ausencia de espacios de suelo descubierto (Huete et al., 1997; Kaufman & Tanré, 1992). Los resultados indican que existe un coeficiente de correlación entre el SAVI y la biomasa vegetal aérea entre -0,02549 y 0,5064 es decir, dicha relación puede ser media (ver Tabla 21).

Tabla 21: Coeficientes de correlación entre peso e índice SARVI

Correlación de Pearson	
SARVI_L30	0,1844239
SARVI_L15	0,0660853
SARVI_S	-0,02549205
SARVI_SP1	0,1119946
SARVI_SP7	0,5064826

El índice OSAVI parte de la premisa que los índices complejos tienen un mejor ajuste a los datos contrastados con la realidad, sin embargo, el problema de estos índices es la interpretación y lo poco práctico de su uso, por ello OSAVI posee una estructura sencilla y de fácil interpretación. Donde Los valores cercanos a 1 son coberturas altamente densas de vegetación y el valor de 0 es de escasa o nula vegetación (Rondeaux et al., 1996). El tipo de suelo y su composición son las determinantes para su contribución en el ruido, variando los resultados. Uno de los más importantes a tomar en cuenta es la materia orgánica, dependiendo es estado de descomposición si es mayor o menor puede presentar una menor o mayor reflectancia del suelo en la banda del infrarrojo (Rondeaux et al., 1996). Los resultados indican que existe un coeficiente de correlación entre el OSAVI y la biomasa vegetal aérea entre -0,0228 y 0,4712 es decir, dicha relación puede ser media (ver Tabla 22).

Tabla 22: Coeficientes de correlación entre peso e índice OSAVI

	Coeficiente de Correlación		
	Pearson	Sperman	Kendall
OSAVI_L30		-0,0857	0,0667
OSAVI_L15	0,06255218		
OSAVI_S	-0,02285754		
OSAVI_SP1	0,000432172		
OSAVI_SP7	0,471203		

El índice EVI al ser de retroalimentación del ruido atmosférico y del suelo, es constante en una amplia variedad de condiciones atmosféricas y de las incertidumbres productos de los cálculos para la corrección atmosférica (Liu & Huete, 1995). Otra cualidad del índice es que no se llega a saturar en condiciones de biomasa de alta densidad (Huete et al., 1997; Matsushita et al., 2007). Los resultados indican que existe un coeficiente de correlación entre el EVI y la biomasa vegetal aérea entre -0,0857 y 0,663 es decir, dicha relación puede ser media (ver Tabla 23).

Tabla 23: Coeficientes de correlación entre peso e índice EVI

	Coeficiente de Correlación		
	Pearson	Sperman	Kendall
EVI_L30		-0,0857	-0,0667
EVI_L15	0,2057814		
EVI_SP1	0,07790766		
EVI_SP7	0,6631999		

Se puede observar en las tablas anteriores (Ver Tabla 17, Tabla 18, Tabla 19, Tabla 20, Tabla 21, Tabla 22 y Tabla 23) 14 correlaciones entre el peso seco de biomasa con un índice de vegetación a una determinada correlación tuvieron un índice de Pearson, Sperman o Kendall de valor negativo o no significativo, es decir, menor a la 0,1. Estas correlaciones fueron retiradas del análisis al no presentar una relación relevante significativa. Las 13 correlaciones restantes se aplicó la prueba de *t-student* para establecer su significancia. En todos los casos en p-valor del test de *t-student* es mayor a 0,05 con lo cual se rechaza la hipótesis nula, es decir, puede que no exista o sea muy débil la relación entre los índices de vegetación y el peso seco de biomasa vegetal. Sin embargo, existen 4 casos que a pasar de rechazar la hipótesis nula pueden tener una correlación significativa con la biomasa vegetal, siendo los casos siguientes: SAVI para SPOT 7m (p-valor = 0,4847), SARVI para SPOT 7m (p-valor = 0,3052), OSAVI para SPOT 7m (p-valor = 0,3455) y EVI para SPOT 7m (p-valor = 0,151). Con los cuales se continuará con el análisis de regresión. (Ver Tabla 24).

Tabla 24: Significancia de la correlación

Correlación de Pearson - Prueba t-Student			
	t	df	p-valor
NDVI_L30	0.231	4	0.829
NDVI_SP7	0.412	4	0.702
ARVI_L30	0.216	4	0.840
ARVI_SP7	0.285	4	0.790
SAVI_L30	0.353	4	0.742
SAVI_L15	0.218	4	0.838
SAVI_SP7	0.769	4	0.485
OSAVI_SP7	1.069	4	0.346
SARVI_L30	0.375	4	0.727
SARVI_SP1	0.225	4	0.833
SARVI_SP7	1.175	4	0.305
EVI_L15	0.421	4	0.696
EVI_SP7	1.772	4	0.151

c) Análisis del coeficiente de determinación

En la Tabla 25 se presenta los coeficientes de determinación. El coeficiente de oscila entre el 0 a 1. Cuanto más cercano a la unidad mayor será el ajuste del modelo a la variable de análisis, es decir, indica la proporción que explica el modelo de la realidad.

Como se observa la mayoría de los casos el coeficiente de determinación en inferior a 0,5, es decir, puede que no exista relación entre el índice de vegetación y la biomasa. Sin embargo, existen 4 casos donde el coeficiente de determinación en mayor a 0,1: SAVI para SPOT 7m (0,129), SARVI para SPOT 7m (0,257), OSAVI para SPOT 7m (0,222), EVI para SPOT 7m (0,440) (Ver Tabla 25). Con los cuales se continuará con el análisis de regresión.

Tabla 25: Coeficiente de determinación

Coeficiente de determinación			
NDVI_L30	0.013	OSAVI_SP7	0.222
NDVI_SP7	0.041	SARVI_L30	0.034
ARVI_L30	0.012	SARVI_SP1	0.013
ARVI_SP7	0.020	SARVI_SP7	0.257
SAVI_L30	0.030	EVI_L15	0.042
SAVI_L15	0.012	EVI_SP7	0.440
SAVI_SP7	0.129		

d) Análisis de regresión

i. SAVI para SPOT 7m

En la Tabla 26 se presenta el resumen del ANOVA. Informa si existe una relación significativa entre las variables. El estadístico F permite el contraste de la hipótesis nula, si el valor población de R es cero, es decir, si la pendiente de la regresión es equivalente a cero. Con un F valor igual a 0,5917 y un p-valor igual a 0,4847 y siendo mayor a 0,05, entonces, se no se rechaza la hipótesis nula. Es decir, es probable que la pendiente de la regresión sea cero, en consecuencia, la biomasa vegetal aérea y el índice SAVI para SPOT 7m pueden no estar relacionados linealmente.

Tabla 26: ANOVA - SAVI para SPOT 7m

	Df	Sum Sq	Mean Sq	F-valor	Pr(>F)
SAVI_SP7	1	138,18	138,18	0,5917	0,4847
Residuos	4	934,2	233,55		

La Tabla 27 muestra los coeficientes de la recta de regresión. El coeficiente correspondiente a “Intercepto” es el origen de la recta de regresión, con t-valor igual a 6,492 y un p-valor igual a 0,0029, siendo menor a 0,05, entonces, se rechaza la hipótesis nula, es decir, es significativa el valor del intercepto. Y el coeficiente correspondiente a “SAVI_SP7” es la pendiente de la recta de regresión, con un t-valor igual a 0,769 y un p-valor igual a 0,4847, siendo mayor a 0,05, entonces, no se rechaza la hipótesis nula, es decir, no es significativa el valor de la pendiente. Según esto la ecuación queda de la siguiente forma:

$$\text{Peso} = 144,87 * \text{SAVI} + 251,21$$

Donde:

Peso = Materia seca vegetal en gramos por metro cuadrado (g MSV/m²).

SAVI = Valor del índice SAVI.

Tabla 27: Coeficientes - SAVI para SPOT 7m

	Coeficiente	Std. Error	t-valor	Pr(> t)
Intercepto	251,21	38,69	6,492	0,0029
SAVI_SP7	144,87	188,33	0,769	0,4847

Nota: Error estándar residual: 15.28 en 4 grados de libertad
Múltiple R cuadrado: 0.1289, R cuadrado ajustado: -0.08893
Estadística F: 0.5917 en 1 y 4 DF, p-valor: 0.4847

En la Figura 42 se presenta 4 gráficas: Residual vs Fitted, Normal Q-Q, Scale-Location y Residual vs Leverage. En la gráfica Residual vs Fitted, los valores se distribuyen de forma aleatoria, es decir, la suposición de que la relación es lineal es razonable. Y ningún residuo sobresale del padrón, es decir, no hay valores atípicos. En el gráfico Normal Q-Q, al presentar los valores muy próximos a la recta oblicua, nos indica que los errores residuales se distribuyen normalmente. En la gráfica Scale-Location, la raíz cuadrada de los residuos estandarizados y se puede verificar la suposición de varianza igual (homocedasticidad), al existir un patrón puede deberse a que no existe homocedasticidad o son muy escaso los valores introducidos. En la gráfica Residual vs Leverage, nos ayuda a encontrar casos influyentes, valores con distancias más grandes a 1 son valores atípicos, al presentarse los valores donde del rango, entonces se puede afirmar que se presenta valores atípicos. En la Figura 43 se presenta la gráfica de la regresión Peso-SAVI_SP7.

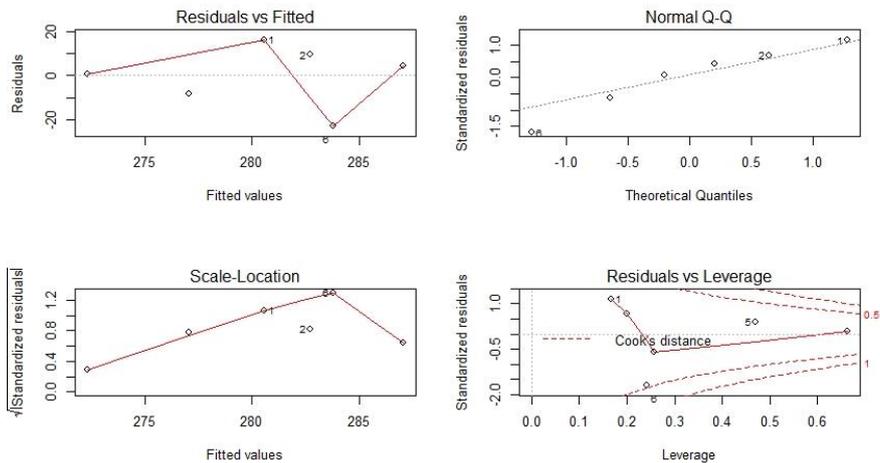


Figura 42. Verificación de Supuestos – SAVI para SPOT 7m

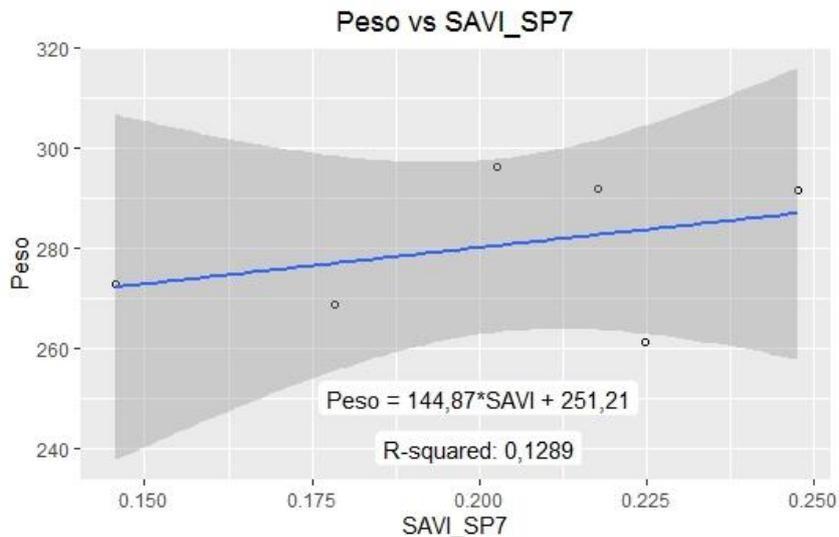


Figura 43. Gráfica de la regresión Peso-SAVI_SP7

ii. SARVI para SPOT 7m

En la Tabla 28 se presenta el resumen del ANOVA. Informa si existe una relación significativa entre las variables. El estadístico F permite el contraste de la hipótesis nula, si el valor población de R es cero, es decir, si la pendiente de la regresión es equivalente a cero. Con un F valor igual a 1,3801 y un p-valor igual a 0,3052 y siendo mayor a 0,05, entonces, se no se rechaza la hipótesis nula. Es decir, es probable que la pendiente de la regresión sea cero, en consecuencia, la biomasa vegetal aérea y el índice SARVI para SPOT 7m pueden no estar relacionados linealmente.

Tabla 28: ANOVA - SARVI para SPOT 7m

	Df	Sum Sq	Mean Sq	F-valor	Pr(>F)
SARVI_SP7	1	275,09	275,09	1,3801	0,3052
Residuos	4	797,29	199,32		

La Tabla 29 muestra los coeficientes de la recta de regresión. El coeficiente correspondiente a “Intercepto” es el origen de la recta de regresión, con t-valor igual a 5,561 y un p-valor igual a 0,00512, siendo menor a 0,05, entonces, se rechaza la hipótesis nula, es decir, es significativa el valor del intercepto. Y el coeficiente correspondiente a “SARVI_SP7” es la pendiente de la recta de regresión, con un t-valor igual a 1,175 y un p-valor igual a 0,30524, siendo mayor a 0,05, entonces, no se rechaza la hipótesis nula, es decir, no es significativa el valor de la pendiente. Según esto la ecuación queda de la siguiente forma:

$$\text{Peso} = 307,21 * \text{SARVI} + 232,04$$

Donde:

Peso = Materia seca vegetal en gramos por metro cuadrado (g MSV/m²).

SARVI = Valor del índice SARVI.

Tabla 29: Coeficientes - SARVI para SPOT 7m

	Coeficiente	Std. Error	t-valor	Pr(> t)
Intercepto	232,04	41,72	5,561	0,00512
SARVI_SP7	307,21	261,5	1,175	0,30524

Nota: Error estándar residual: 14.12 en 4 grados de libertad
Múltiple R cuadrado: 0.2565, R cuadrado ajustado: 0.07066
Estadística F: 1.38 en 1 y 4 DF, p-valor: 0.3052

En la Figura 44 se presenta 4 gráficas: Residual vs Fitted, Normal Q-Q, Scale-Location y Residual vs Leverage. En la gráfica Residual vs Fitted, los valores se distribuyen de forma

aleatoria, es decir, la suposición de que la relación es lineal es razonable. Y ningún residuo sobresale del padrón, es decir, no hay valores atípicos. En el gráfico Normal Q-Q, al presentar los valores muy próximos a la recta oblicua, nos indica que los errores residuales se distribuyen normalmente. En la gráfica Scale-Location, la raíz cuadrada de los residuos estandarizados y se puede verificar la suposición de varianza igual (homocedasticidad), al existir un patrón puede deberse a que no existe homocedasticidad o son muy escaso los valores introducidos. En la gráfica Residual vs Leverage, nos ayuda a encontrar casos influyentes, valores con distancias más grandes a 1 son valores atípicos, al presentarse los valores donde del rango, entonces se puede afirmar que se presenta valores atípicos. En la Figura 45 se presenta la gráfica de la regresión Peso-SARVI_SP7.

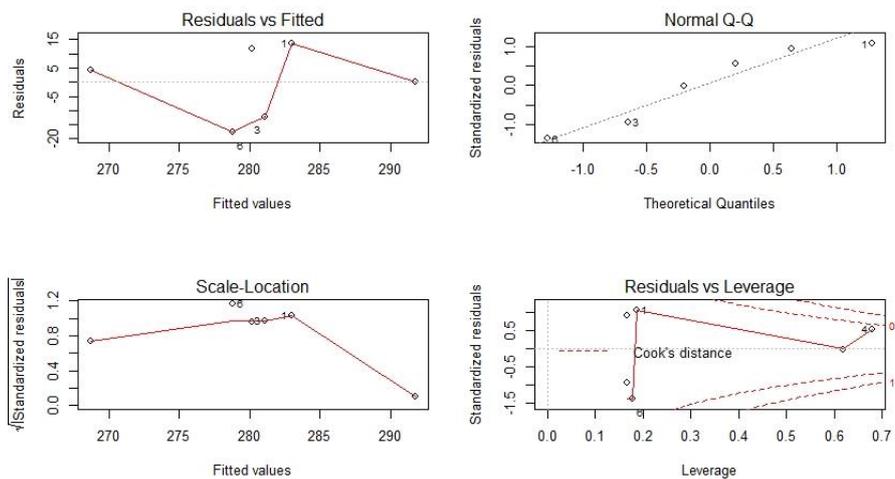


Figura 44. Verificación de Supuestos – SARVI para SPOT 7m

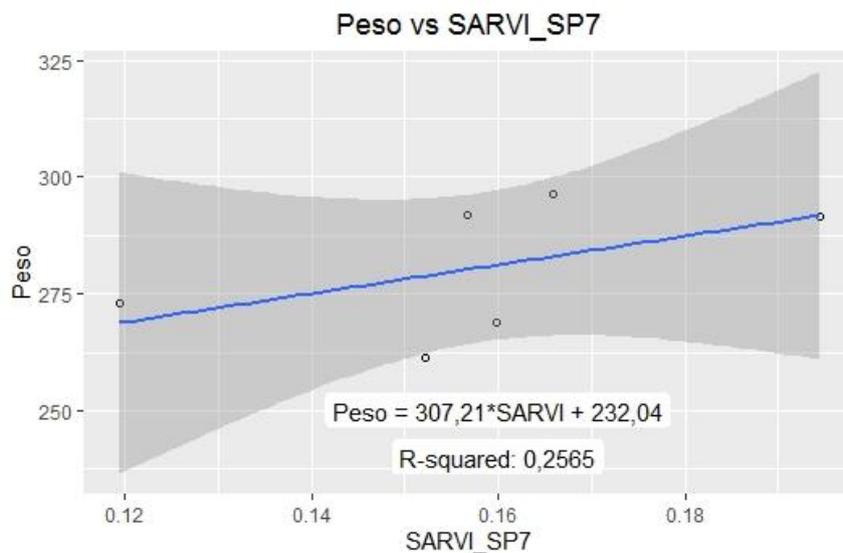


Figura 45. Gráfica de la regresión Peso-SARVI_SP7

iii. OSAVI para SPOT 7m

En la Tabla 30 se presenta el resumen del ANOVA. Informa si existe una relación significativa entre las variables. El estadístico F permite el contraste de la hipótesis nula, si el valor población de R es cero, es decir, si la pendiente de la regresión es equivalente a cero. Con un F valor igual a 1,1416 y un p-valor igual a 0,3455 y siendo mayor a 0,05, entonces, se no se rechaza la hipótesis nula. Es decir, es probable que la pendiente de la regresión sea cero, en consecuencia, la biomasa vegetal aérea y el índice OSAVI para SPOT 7m pueden no estar relacionados linealmente.

Tabla 30: ANOVA - OSAVI para SPOT 7m

	Df	Sum Sq	Mean Sq	F-valor	Pr(>F)
OSAVI_SP7	1	238,1	238,1	1,1416	0,3455
Residuos	4	834,28	208,57		

La Tabla 31 muestra los coeficientes de la recta de regresión. El coeficiente correspondiente a “Intercepto” es el origen de la recta de regresión, con t-valor igual a 4,031 y un p-valor igual a 0,0157, siendo menor a 0,05, entonces, se rechaza la hipótesis nula, es decir, es significativa el valor del intercepto. Y el coeficiente correspondiente a “OSAVI_SP7” es la pendiente de la recta de regresión, con un t-valor igual a 1,068 y un p-valor igual a 0,3455, siendo mayor a 0,05, entonces, no se rechaza la hipótesis nula, es decir, no es significativa el valor de la pendiente. Según esto la ecuación queda de la siguiente forma:

$$\text{Peso} = 212,55 * \text{OSAVI} + 222,06$$

Donde:

Peso = Materia seca vegetal en gramos por metro cuadrado (g MSV/m²).

OSAVI = Valor del índice OSAVI.

Tabla 31: Coeficientes - OSAVI para SPOT 7m

	Coeficiente	Std. Error	t-valor	Pr(> t)
Intercepto	222,06	55,09	4,031	0,0157
OSAVI_SP7	212,55	198,93	1,068	0,3455

Nota: Error estándar residual: 14.44 en 4 grados de libertad
Múltiple R cuadrado: 0.222, R cuadrado ajustado: 0.02754
Estadística F: 1.142 en 1 y 4 DF, p-valor: 0.3455

En la Figura 46 se presenta 4 gráficas: Residual vs Fitted, Normal Q-Q, Scale-Location y

Residual vs Leverage. En la gráfica Residual vs Fitted, los valores se distribuyen de forma aleatoria, es decir, la suposición de que la relación es lineal es razonable. Y ningún residuo sobresale del padrón, es decir, no hay valores atípicos. En el gráfico Normal Q-Q, al presentar los valores muy próximos a la recta oblicua, nos indica que los errores residuales se distribuyen normalmente. En la gráfica Scale-Location, la raíz cuadrada de los residuos estandarizados y se puede verificar la suposición de varianza igual (homocedasticidad), al existir un patrón puede deberse a que no existe homocedasticidad o son muy escaso los valores introducidos. En la gráfica Residual vs Leverage, nos ayuda a encontrar casos influyentes, valores con distancias más grandes a 1 son valores atípicos, al presentarse los valores donde del rango, entonces se puede afirmar que se presenta valores atípicos. En la Figura 47 se presenta la gráfica de la regresión Peso-SAVI_SP7.

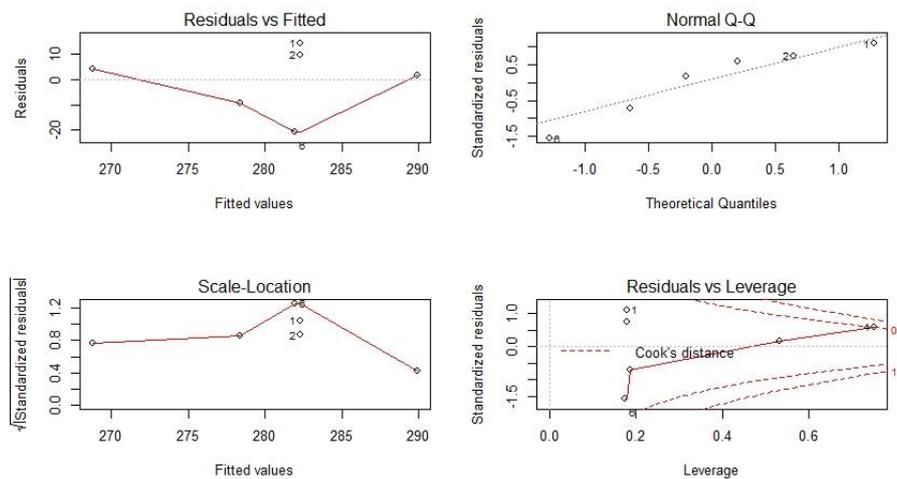


Figura 46. Verificación de Supuestos – OSAVI para SPOT 7m

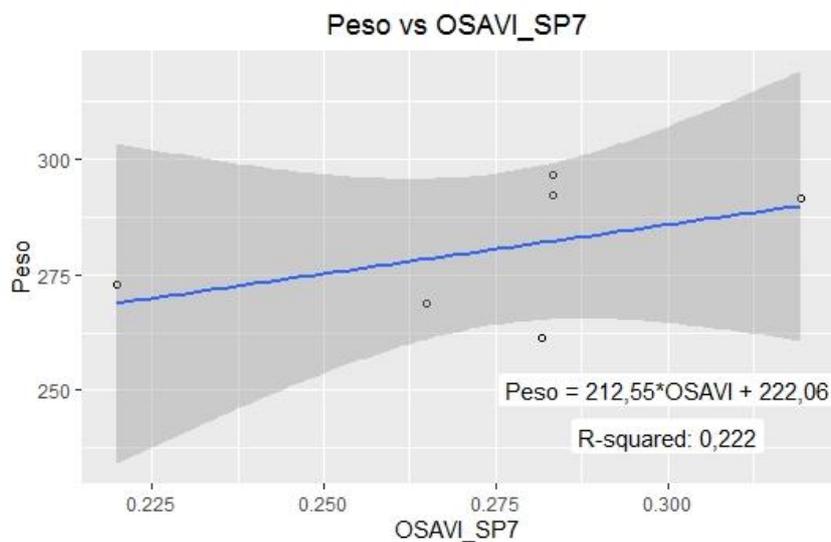


Figura 47. Gráfica de la regresión Peso-OSAVI_SP7

iv. EVI para SPOT 7m

En la Tabla 32 se presenta el resumen del ANOVA. Informa si existe una relación significativa entre las variables. El estadístico F permite el contraste de la hipótesis nula, si el valor población de R es cero, es decir, si la pendiente de la regresión es equivalente a cero. Con un F valor igual a 3,1407 y un p-valor igual a 0,151 y siendo mayor a 0,05, entonces, se no se rechaza la hipótesis nula. Es decir, es probable que la pendiente de la regresión sea cero, en consecuencia, la biomasa vegetal aérea y el índice EVI para SPOT 7m pueden no estar relacionados linealmente.

Tabla 32: ANOVA - EVI para SPOT 7m

	Df	Sum Sq	Mean Sq	F-valor	Pr(>F)
EVI_SP7	1	471,67	471,67	3,1407	0,151
Residuos	4	600,71	150,18		

La Tabla 33 muestra los coeficientes de la recta de regresión. El coeficiente correspondiente a “Intercepto” es el origen de la recta de regresión, con t-valor igual a 6,07 y un p-valor igual a 0,00372, siendo menor a 0,05, entonces, se rechaza la hipótesis nula, es decir, es significativa el valor del intercepto. Y el coeficiente correspondiente a “EVI_SP7” es la pendiente de la recta de regresión, con un t-valor igual a 1,772 y un p-valor igual a 0,15105, siendo mayor a 0,05, entonces, no se rechaza la hipótesis nula, es decir, no es significativa el valor de la pendiente. Según esto la ecuación queda de la siguiente forma:

$$\text{Peso} = 327,45 * \text{EVI} + 217,66$$

Donde:

Peso = Materia seca vegetal en gramos por metro cuadrado (g MSV/m²).

EVI = Valor del índice EVI.

Tabla 33: Coeficientes - EVI para SPOT 7m

	Coeficiente	Std. Error	t-valor	Pr(> t)
Intercepto	217,66	35,86	6,07	0,00372
EVI_SP7	327,45	184,77	1,772	0,15105

Nota: Error estándar residual: 12,25 en 4 grados de libertad
Múltiple R cuadrado: 0,4398, R cuadrado ajustado: 0,2998
Estadística F: 3,141 en 1 y 4 DF, p-valor: 0,151

En la Figura 50 se presenta 4 gráficas: Residual vs Fitted, Normal Q-Q, Scale-Location y Residual vs Leverage. En la gráfica Residual vs Fitted, los valores se distribuyen de forma

aleatoria, es decir, la suposición de que la relación es lineal es razonable. Y ningún residuo sobresale del padrón, es decir, no hay valores atípicos. En el gráfico Normal Q-Q, al presentar los valores muy próximos a la recta oblicua, nos indica que los errores residuales se distribuyen normalmente. En la gráfica Scale-Location, la raíz cuadrada de los residuos estandarizados y se puede verificar la suposición de varianza igual (homocedasticidad), al existir un patrón puede deberse a que no existe homocedasticidad o son muy escaso los valores introducidos. En la gráfica Residual vs Leverage, nos ayuda a encontrar casos influyentes, valores con distancias más grandes a 1 son valores atípicos, al presentarse los valores donde del rango, entonces se puede afirmar que se presenta valores atípicos. En la Figura 51 se presenta la gráfica de la regresión Peso-SAVI_SP7.

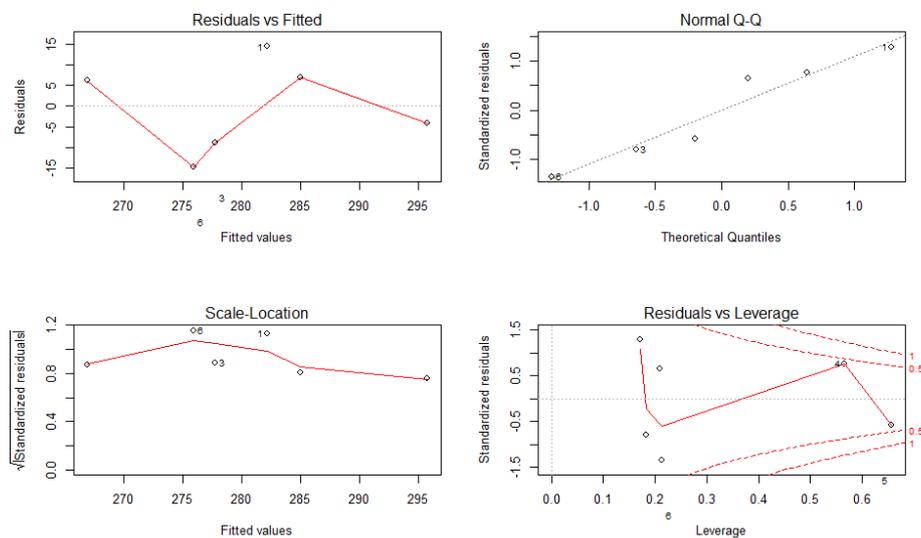


Figura 48. Verificación de Supuestos – EVI para SPOT 7m

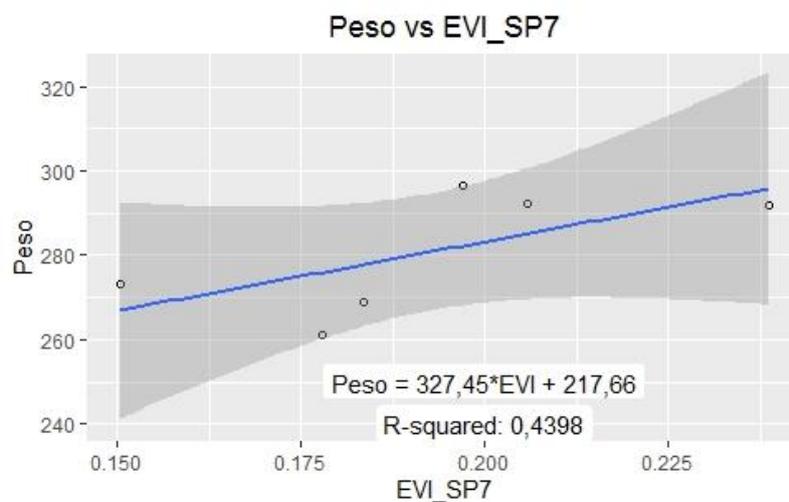


Figura 49. Gráfica de la regresión Peso-EVI_SP7

e) Comprobación de los supuestos en los residuos de la regresión

En la Tabla 34, se presenta la prueba de normalidad para los residuos se usó el test de Shapiro-Wilk. El índice SAVI para SPOT a una resolución de 7m tiene un p-valor de 0,8169, por lo cual no se rechaza la hipótesis nula, es decir, los residuos presentan una distribución normal (media y desviación típica). El índice SARVI para SPOT a una resolución de 7m tiene un p-valor de 0,5079, por lo cual no se rechaza la hipótesis nula, es decir, los residuos presentan una distribución normal (media y desviación típica). El índice OSAVI para SPOT a una resolución de 7m tiene un p-valor de 0,6775, por lo cual no se rechaza la hipótesis nula, es decir, los residuos presentan una distribución normal (media y desviación típica). El índice EVI para SPOT a una resolución de 7m tiene un p-valor de 0,7848, por lo cual no se rechaza la hipótesis nula, es decir, los residuos presentan una distribución normal (media y desviación típica).

Tabla 34: Normalidad de los residuos - Test de Shapiro-Wilk

Normalidad de los residuos - Test de Shapiro		
	W	p-valor
SAVI_SP7	0.95963	0.8169
SARVI_SP7	0.92035	0.5079
OSAVI_SP7	0.94226	0.6775
EVI_SP7	0.95554	0.7848

En la Tabla 35 se presenta la prueba de homocedasticidad para los residuos, se usó el test de Breusch-Pagan. El índice SAVI para SPOT a una resolución de 7m tiene un p-valor de 0,8169, por lo cual no se rechaza la hipótesis nula, los residuos presentan homocedasticidad, es decir, los residuos tienen una varianza constante. El índice SARVI para SPOT a una resolución de 7m tiene un p-valor de 0,91958, por lo cual no se rechaza la hipótesis nula, los residuos presentan homocedasticidad, es decir, los residuos tienen una varianza constante. El índice OSAVI para SPOT a una resolución de 7m tiene un p-valor de 0,82029, por lo cual no se rechaza la hipótesis nula, los residuos presentan homocedasticidad, es decir, los residuos tienen una varianza constante. El índice EVI para SPOT a una resolución de 7 m tiene un p-valor de 0,76094, por lo cual no se rechaza la hipótesis nula, los residuos presentan homocedasticidad, es decir, los residuos tienen una varianza constante.

Tabla 35: Prueba de homocedasticidad - test de Breusch-Pagan

Comprobar la Heterocedasticidad - test de Breusch-Pagan			
	chi-square	df	p
SAVI_SP7	0.434823	1	0.50963
SARVI_SP7	0.010194	1	0.91958
OSAVI_SP7	0.05160718	1	0.82029
EVI_SP7	0.09256708	1	0.76094

En la Tabla 36 se presenta la prueba de independencia para los residuos, se usó el test de Durbin-Watson. Es usada esta prueba para detectar autocorrelación en los residuos, es decir, si existe relación entre los valores y el orden de obtención. La hipótesis nula supone una autocorrelación igual a cero. El índice SAVI para SPOT a una resolución de 7 m tiene un p-valor de 0,1501, por lo cual no se rechaza la hipótesis nula, los residuos presentan independencia, es decir, los residuos no presentan autocorrelación. El índice SARVI para SPOT a una resolución de 7 m tiene un p-valor de 0,3637, por lo cual no se rechaza la hipótesis nula, los residuos presentan independencia, es decir, los residuos no presentan autocorrelación. El índice OSAVI para SPOT a una resolución de 7m tiene un p-valor de 0,1955, por lo cual no se rechaza la hipótesis nula, los residuos presentan independencia de los datos, es decir, los residuos no presentan autocorrelación. El índice EVI para SPOT a una resolución de 7 m tiene un p-valor de 0,241, por lo cual no se rechaza la hipótesis nula, los residuos presentan independencia, es decir, los residuos no presentan autocorrelación.

Tabla 36: Prueba de independencia de los residuos - test de Durbin-Watson

Prueba de independencia de los residuos		
	DW	p-valor
SAVI_SP7	1.2558	0.1501
SARVI_SP7	1.4747	0.3637
OSAVI_SP7	1.2974	0.1955
EVI_SP7	1.2381	0.241

4.7 Selección del modelo

Para la selección del modelo que mejor explique la variable dependiente se compara el cuadrado medio del error (RMSE, por sus siglas en ingles) de cada regresión. El RMSE compara el valor predicho con un valor observado, siendo a menor RMSE menor será la cantidad de error entre dichos conjuntos de datos. En la Tabla 37 se presenta el RMSE de los modelos de regresión. El índice que presenta menor RMSE es EVI para SPOT a una

resolución de 7 m. Por lo cual se usó este modelo de regresión para la elaboración del mapa de biomasa de vegetación aérea estimada.

Tabla 37: Cuadrado medio del error

	RMSE
SAVI_SP7	12.478
SARVI_SP7	11.527
OSAVI_SP7	11.792
EVI_SP7	10.006

4.8 Mapa de vegetación

Para facilitar el análisis de la vegetación presente en la zona de estudio se clasificaron en 10 categorías según su uso, tipo de vegetación, estructura y su respuesta espectral. En Tabla 38 se describe las clases de cobertura. Se usó la clasificación y técnicas descripción de Küchler (1988e), Küchler & Zonneveld (1988), Matteucci & Colma (2002), Mueller-Dombois & Ellenberg (1974), Mulder (1988), Van der Zee & Huizing (1988) y Zonneveld (1988) como referencias para su elaboración.

Tabla 38: Descripción de las formaciones vegetales

CATEGORÍA	DESCRIPCIÓN
Bosque	Formado en su mayoría por árboles de Eucalipto
Pradera	Vegetación latifoliada, hojas blandas, perennes y pequeñas. Están presentes especies de gramíneas de una altura de hasta 0,5 m.
Pradera densa	Vegetación latifoliada, hojas blandas, perennes y pequeñas. Están presentes especies arbustivas y gramíneas De una altura que puede superar los 0,5 m.
Agricultura	Presencia de cultivos de hortalizas, pastos, y campos en descanso
Suelo	Sin vegetación o muy escasa cobertura vegetal
Edificios y caminos	Construcciones como centro poblado, edificios, plazas y caminos
Matorral denso	Vegetación leñosa, hojas blandas o esclerófilas, perennes y medianas. Están presentes especies arbustivas que cubren más del 75 % de la superficie. De cobertura continua.
Matorral joven o ralo	Vegetación leñosa, hojas blandas o esclerófilas, perennes y medianas. Están presentes especies arbustivas que cubren menos del 25 % de la superficie. De cobertura en grupos. Pueden estar presentes especies de gramíneas y pastos.
Matorral	Vegetación leñosa, hojas blandas o esclerófilas, perennes y medianas. Están presentes especies arbustivas que cubren entre el 25-50 % de la superficie. De cobertura discontinua. Pueden estar presentes especies de gramíneas y pastos.
No Clasificado	Cobertura que no está contemplado en alguna categoría anterior.

Nota: Se elaboró siguiendo las recomendaciones de Matteucci & Colma (2002) Metodología para el estudio de la vegetación.

Según la anterior clasificación, los puntos de muestreo están categorizados según se detalla en la Tabla 39.

Tabla 39: Clasificación de los puntos de muestreo

Punto de muestreo	Categoría
A1	Matorral denso
A2	Matorral joven o ralo
A3	Matorral denso
M1	Matorral joven o ralo
M2	Pradera
C1	Pradera densa
C2	Pradera
Max. 1	Pradera densa

En base a la clasificación de la Tabla 38 y Tabla 39 se elaboró el “Mapa de clasificación de la vegetación” (ver Figuras 52 y Figura 53). Se usó las técnicas descritas en Küchler 1(1988), Küchler (1988c, 1988b), Mulder (1988) y Van der Zee & Huizing (1988).

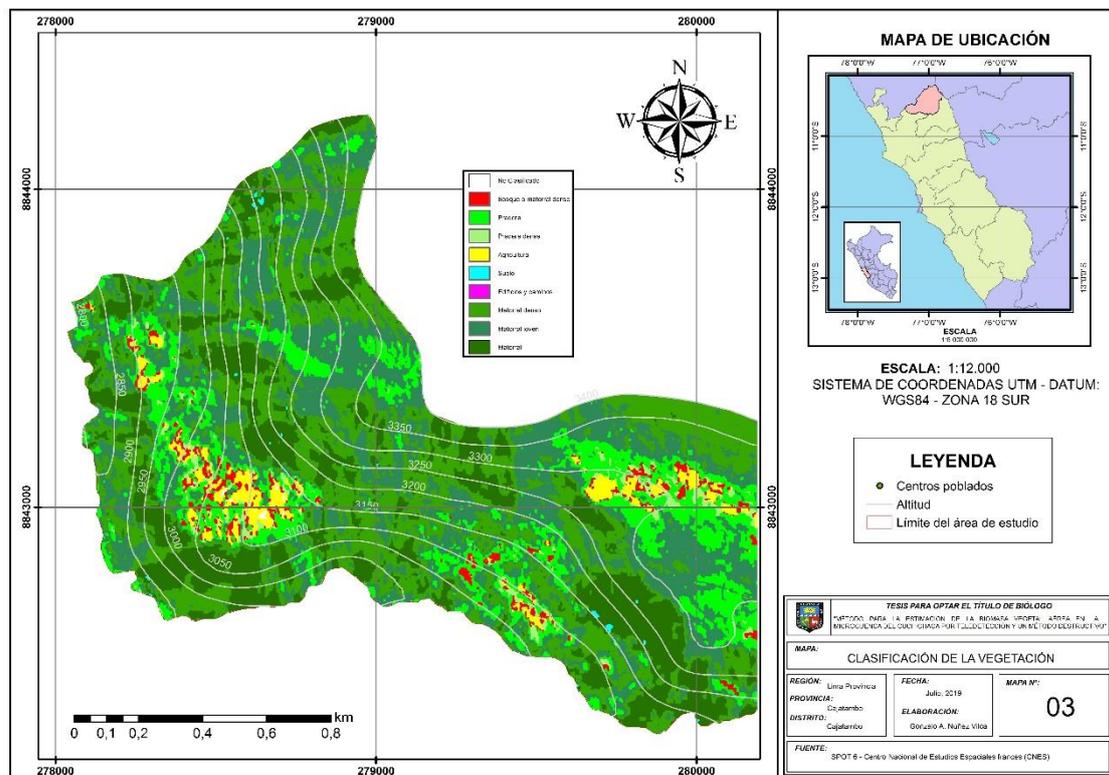


Figura 50. Mapa de clasificación de la vegetación - Parte 1

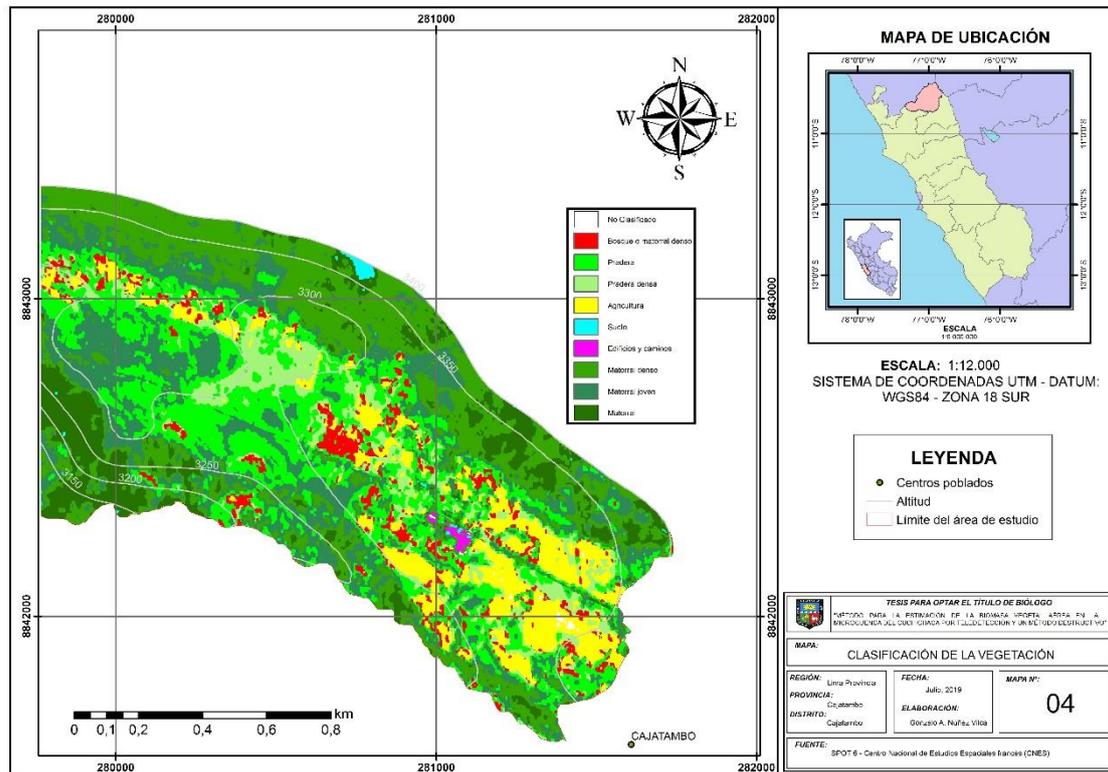


Figura 51. Mapa de clasificación de la vegetación - Parte 2

4.9 Mapa de biomasa vegetal aérea

Según Anaya et al. (2008) existe una relación ente la estructura de la vegetación y el funcionamiento del ecosistema. Por lo cual, sugieren que para la estimación de la biomasa se debe primero categorizar la vegetación según la estructura, descartando aquellas de los cuales no se registren datos en campo. Por lo cual, se propone un “Mapa de biomasa vegetal estimada” (ver Figura 54 y Figura 55) que incluya las formaciones vegetales de: Matorral, Matorral joven o ralo, Matorral denso, Pradera y Pradera densa. Se descartaron las formaciones de Agricultura y Bosque, al no contar con datos en campo. Y se descartaron, también, suelo y edificaciones por ser categorías que no incluyen formas vegetales.

Se usó la ecuación de regresión para el índice EVI para el satélite SPOT a una resolución de 7 m ($\text{Peso} = 327,45 \cdot \text{EVI} + 217,66$, donde Peso en g MSV/m^2) para hacer la estimación de la biomasa vegetal aérea por constar con el menor RMSE (10,006) como se mencionó anteriormente y se usó la ecuación con el mejor ajuste ($R^2 = 0,43$).

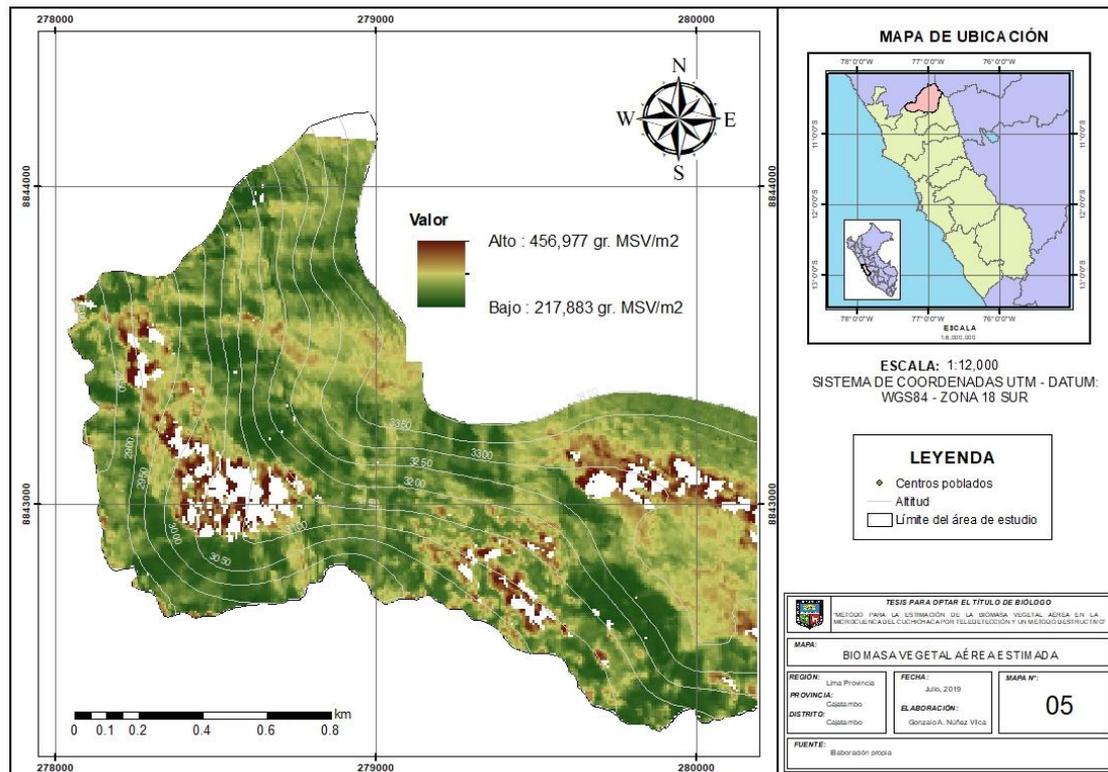


Figura 52. Mapa de biomasa vegetal aérea - Parte 1

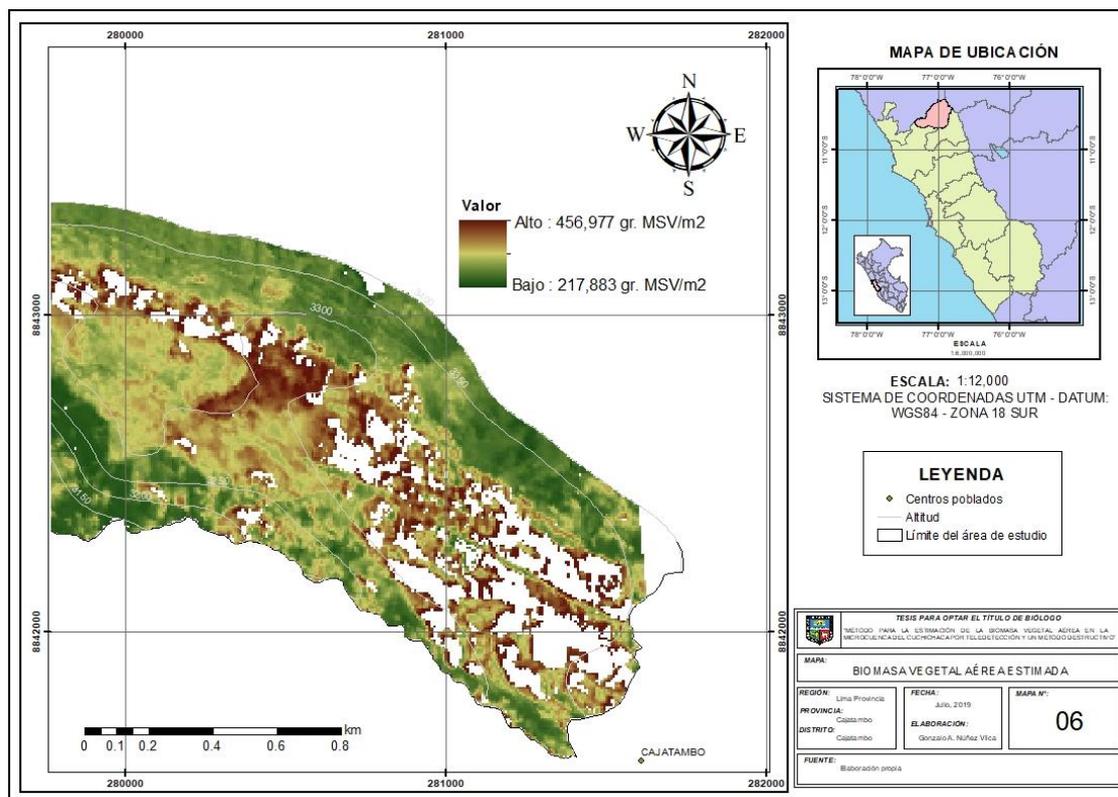


Figura 53. Mapa de biomasa vegetal aérea - Parte 2

4.10 Mapa de biomasa vegetal estimada como instrumento en el marco de la gestión ambiental

En las guías de elaboración de mapas referido a la vegetación por las instituciones gubernamentales nacionales se recomiendan hacer estudios de parches de formación vegetal, unidades de paisaje, zonificación ecológica y económica entre otros, pero, por lo general, no se registra la estructura vegetal como un mapa independiente para la toma de decisiones. La biomasa estimada también debe presentar como un mapa independiente para un estudio y comprensión a más profundidad de las dinámicas y cambios estaciones de la vegetación (Andreasen, Neill, Noss, & Slosser, 2001; Margalef, 1982; Mueller-Dombois & Ellenberg, 1974).

V. CONCLUSIONES

1. A partir de la caracterización la cobertura vegetal de la zona de estudio usando imágenes satelitales y observación directa se propuso 10 categorías de parches, ocho de formaciones vegetales, uno de actividades antrópicas y uno que no se identificó.
2. El modelo de estimación en base al índice EVI fue el que mejor explicó la biomasa vegetal aérea a una resolución espacial de 7 metros usando el satélite SPOT 6 a pesar de no tener significancia estadística. La respectiva ecuación de estimación de biomasa vegetal aérea para el área de estudio, donde predomina las praderas, matorrales y agricultura fue el siguiente:

$$Peso = 327,45xEVI + 217,66, \text{ en g MSV/m}^2$$

3. Con el modelo de estimación seleccionado se elaboró el mapa de biomasa vegetal aérea y con las categorías de cobertura vegetal propuestas para la zona de estudio se elaboró el mapa de cobertura vegetal.

VI. RECOMENDACIONES

- Aplicar el método Relevé para las zonas altoandinas para calcular el área mínima de muestreo de caracterización.
- Tener especial cuidado en la cosecha para evitar errores en la composición de la muestra o alícuota.
- Tener imágenes satelitales lo más próximo a la fecha de cosecha de las parcelas.
- Solo se debe tomar las parcelas que presenten una estructura semejante y comparable en el contenido de biomasa.
- En los trabajos posteriores se debe poner más atención a las zonas de frontera o de transición entre las formaciones vegetales.
- Para el índice EVI es necesario varios estudios adicionales para tener una validación de la aplicación del índice para diferentes factores de perturbación o ruido y ecosistemas de estudio.
- Elaborar un mapa de vegetación y otro de biomasa estimada independiente cuando se realice los estudios ambientales o investigaciones relacionados a estudios de vegetación. Con un nivel de detalle y escala fino, con un esfuerzo de campo suficiente y representativo.
- En la elaboración y aplicación de instrumentos en el ámbito ambiental, independientemente de su índole, se debe tomar el supuesto que no es necesario tener un conocimiento último de la naturaleza para poder gestionarlo.
- Los mapas confeccionados con esta metodología pueden servir de base para la toma de decisiones en planes de manejo y gestión de los ecosistemas.

VII. BIBLIOGRAFÍA

- Agua y SIG. (2001). *Análisis de imágenes de satélite Con ArcGis 2 - Agua y SIG*. Agua y SIG. Recuperado de: https://www.aguaysig.com/2011/05/analisis-de-imagenes-de-satelite-con_03.html
- Aguilar, C., Zinnert, J. C., Polo, M. J., & Young, D. R. (2012). NDVI as an indicator for changes in water availability to woody vegetation. *Ecological Indicators*, 23(2012), 290–300. <https://doi.org/10.1016/j.ecolind.2012.04.008>
- Airbus Defence and Space. (2013). SPOT 6 | SPOT 7 Broad Coverage Your Solution for National Coverages in High Resolution. *Airbus*, 1–2. Recuperado de: https://www.intelligence-airbusds.com/files/pmedia/public/r49229_9_spot_67.pdf
- Alonso, P. (n.d.). *Asignatura de teledetección*. Murcia, España. Retrieved June 4, 2018, from <https://www.um.es/geograf/sigmur/teledet/>
- Alzate, B. E. (n.d.). *Introducción al procesamiento de imágenes satelitales*. Recuperado de: <https://es.scribd.com/document/203511609/introduccion-procesamiento-imagenes-satelitales>
- Anaya Acevedo, J., Chuvieco Salinero, E., & Palacios Orueta, A. (2008). Estimación de biomasa aérea en Colombia a partir de imágenes MODIS. *Revista de Teledetección*, 30, 5–22. Recuperado de: https://www.academia.edu/30159734/Estimacion_de_biomasa_aerea_en_Colombia_a_partir_de_imagenes_MODIS?auto=download
- Andreasen, J. K., Neill, R. V. O., Noss, R., & Slosser, N. C. (2001). Considerations for the development of a terrestrial index of ecological integrity. *Ecological Indicators*, 1(2001), 21–35.
- Asrar, G., Fuchs, M., Kanemasu, E. T., & Hatfield, J. L. (2010). Estimating Absorbed Photosynthetic Radiation and Leaf Area Index from Spectral Reflectance in Wheat1. *Agronomy Journal*, 76(2), 300. <https://doi.org/10.2134/agronj1984.00021962007600020029x>

- Avolio, M. L., Forrester, E. J., Chang, C. C., La Pierre, K. J., Burghardt, K. T., & Smith, M. D. (2019). Demystifying dominant species. *The New Phytologist*, 223(3), 1106–1126. <https://doi.org/10.1111/nph.15789>
- Baret, F., & Guyot, G. (1991). Potentials and Limits of Vegetation Indices for LAI and APAR Assessment. *Remote Sensing of Environment*, 35, 161–173.
- Baret, F., Guyot, G., & Major, D. J. (1989). TSAVI: A vegetation index which minimizes soil brightness effects on LAI and APAR estimation. *12th Canadian Symposium on Remote Sensing Geoscience and Remote Sensing Symposium*, 1355–1358.
- Baret, F., Jacquemoud, S., & Hanocq, J. F. (1993). About the soil line concept in remote sensing. *Advances in Space Research*, 13(5), 281–284. [https://doi.org/10.1016/0273-1177\(93\)90560-X](https://doi.org/10.1016/0273-1177(93)90560-X)
- Baret, Frédéric, & Andrieu, B. (1994). Intérêt du moyen infrarouge pour caractériser la végétation. *Bulletin de La Société Française de Photogrammétrie et Télédétection*, 136(1994), 8–22.
- Brown, S., & Lugo, A. (1992). Aboveground biomass estimates for tropical moist forests of the Brazilian Amazon. *Interciencia. Caracas*, 17(1), 8–18.
- Bunge, M. (2004). *Emergencia y convergencia*. Gedisa editorial.
- Burrough, P. & McDonnell, R. (2000). *Principles of Geographical Information Systems*. Oxford University Press, Oxford, Reino Unido
- Butler, M., Mouchot, M., Barale, V., & LeBlanc, C. (1990). *Aplicación de la tecnología de percepción remota a las pesquerías marinas: manual introductorio (figura)*. FAO. Recuperado de: <http://www.fao.org/3/t0355s/t0355s02.htm>
- Buzai, G., Baxendale, C., Humacata, L. & Principi, N. (2016). *Sistemas de información geográfica: Cartografía temática y análisis espacial*. Editorial Lugar.
- Cabrera Ortega, Y., & García Pérez, A. (2015). *Análisis estadísticos de datos espaciales con QGIS y R*. Universidad Nacional de Educación a Distancia. <http://reader.digitalbooks.pro/book/preview/81209/00003.html?1562512337130>
- Cáceres, J., Pilar Martín, M., & Salas, J. (2015). Análisis temporal de biomasa y stocks de carbono en un ecosistema de dehesa mediante imágenes Landsat, y su relación con factores climáticos. *Ciencias Espaciales*, 8(1), 190–211.

<https://doi.org/10.5377/ce.v8i1.2049>

- Castillo, J. A. A., Apan, A. A., Maraseni, T. N., & Salmo, S. G. (2017). Estimation and mapping of above-ground biomass of mangrove forests and their replacement land uses in the Philippines using Sentinel imagery. *ISPRS Journal of Photogrammetry and Remote Sensing*, 134, 70–85. <https://doi.org/10.1016/j.isprsjprs.2017.10.016>
- Centre national d'études spatiales (CNES). (2018). *SPOT*. CNES. <https://spot.cnes.fr/en/SPOT/index.htm>.
- Centro de información territorial de la Junta de Castilla y León (CIT). (2009). Sistemas de localización e información geográfica. Junta de Castilla y León.
- Chaiña, F. (2014). Las ainocas en el distrito de ácora Puno-Perú. *La vida y la historia*, 3(2), 48-53. ISSN 2312-9115.
- Chapin, F. S., Folke, C., & Kofinas, G. P. (2009). A Framework for Understanding Change. In C. Folke, G. P. Kofinas, & F. S. Chapin (Eds.), *Principles of Ecosystem Stewardship: Resilience-Based Natural Resource Management in a Changing World*. Springer New York. <https://doi.org/10.1007/978-0-387-73033-2>
- Chuvieco, E. (1996). *Fundamentos de teledetección espacial* (2nd ed.). Ediciones RIALP.
- Chuvieco, E. (2010). *Teledetección ambiental: La observación de la tierra desde el espacio* (Nva. ed. a). Editorial Ariel.
- CNICE (Centro Nacional de informática y comunicación educativa). (2006). *Interacción radiación electromagnética - materia*. CNICE. http://concurso.cnice.mec.es/cnice2006/material121/unidad1/firma_es.htm
- Cole, D. N., & McCool, S. F. (1998). Limits of Acceptable Change and Natural Resources Planning: When is LAC Useful, When is it Not? *Change, March*, 69–71. Recuperado de: http://www.fs.fed.us/outernet/r10/tongass/districts/ketchikan/recplanning/LAC_When_is_it_Useful_When_is_it_Not_Cole_McCool.pdf
- Cruz, P. (2009). Manual de Sistemas de Información Geográfico (SIG). (3er ed.). Programa de Fortalecimiento del Régimen Municipal y Desarrollo Local de Honduras.
- CuscoPeru. (2018). *Clima en la Sierra - Cusco y Machu Picchu*. CuscoPeru. Recuperado de: [https://www.cuscoperu.com/es/informacion-util/geografia-y-climas/clima-en-la-](https://www.cuscoperu.com/es/informacion-util/geografia-y-climas/clima-en-la)

sierra

- CYMPER. (2017). *Prisma de Luz (figura)*. CYMPER. Recuperado de: <https://www.cymper.com/blog/pigmentos-para-cemento-y-hormigon/prisma-de-luz/>
- Darvishzadeh, R., Atzberger, C., & Skidmore, A. K. (2006). Hyperspectral vegetation indices for estimation of leaf area index. *Proceedings of the ISPRS Commission VII Symposium 'Remote Sensing: From Pixels to Processes*, 6. Recuperado de: <http://www.isprs.org/proceedings/XXXVI/part7/PDF/233.pdf>
- Del Bosque González, I., Fernández Freire, C., Martín-Forero Morente, L. & Pérez Asensio, E. (2012). Los sistemas de información geográfica y la investigación en Ciencias Humanas y Sociales. Conferencia Española de Centros de Estudios Locales (CSIC).
- Dinon, M., Delgado, S. & Castaño, F. (2019). Tamaño óptimo de parcela e incidencia de la podredumbre blanca del capítulo del girasol en el sudeste bonaerense. *Revista de la Facultad de Agronomía*, 118(1), 37-44. <http://sedici.unlp.edu.ar/handle/10915/77210>
- Du, H., Cui, R., Zhou, G., Shi, Y., Xu, X., Fan, W., & Lü, Y. (2010). The responses of Moso bamboo (*Phyllostachys heterocycla* var. *pubescens*) forest aboveground biomass to Landsat TM spectral reflectance and NDVI. *Acta Ecologica Sinica*, 30(5), 257–263. <https://doi.org/10.1016/j.chnaes.2010.08.005>
- El espectrómetro*. (n.d.). Retrieved August 14, 2018, from <https://elespectrofotometro.com/wp-content/uploads/2017/01/espectro-electromagnetico-e1484162122522.jpg>
- Escandon Calderón, J., De Jong, B. H. J., & Ochoa Gaona, S. (1999). Evaluación de dos métodos para la estimación de biomasa arbórea a través de datos LANDSAT TM en Jusnajib La Laguna, Chiapas, México: estudio de caso. *Investigaciones Geográficas*, 1(40), 71–84. <https://doi.org/10.14350/rig.59095>
- European Space Agency (ESA). (n.d.-a). *Level 1*. ESA. Retrieved July 23, 2019, from <https://earth.esa.int/web/sentinel/user-guides/sentinel-2-msi/processing-levels/level-1>
- European Space Agency (ESA). (n.d.-b). *Sentinel-2*. ESA. Retrieved September 24, 2018, from <https://sentinel.esa.int/web/sentinel/missions/sentinel-2>

- Fan, X., & Liu, Y. (2016). A global study of NDVI difference among moderate-resolution satellite sensors. *ISPRS Journal of Photogrammetry and Remote Sensing*, 121(2016), 177–191. <https://doi.org/10.1016/j.isprsjprs.2016.09.008>
- Farina, A. (2010). *Ecology, Cognition and Landscape: Linking Natural and Social Systems*. Spring.
- Farina, A. (2006). *Principies and Methods in Landscape Ecology*.
- Fernández-Coppel, I., & Herrero Llorente, E. (2001). El satélite LANDSAT: análisis visual de imágenes obtenidas del sensor ETM+ Satélite LANDSAT. In *Universidad de Valladolid* (p. 37). Universidad de Valladolid. Recuperado de: <http://www.cartesia.org/data/apuntes/teledeteccion/landsat-analisis-visual.pdf>
- Flores-Nieves, P., López-López, M. A., Ángeles-Pérez, G., De la Isla-Serrano, M. D. L., & Calva-Vásquez, G. (2011). MODELOS PARA ESTIMACIÓN Y DISTRIBUCIÓN DE BIOMASA DE *Abies religiosa* (Kunth) Schltdl. et Cham. EN PROCESO DE DECLINACIÓN. *Revista Mexicana de Ciencias Forestales*, 2(8), 9–20. <https://doi.org/10.29298/rmcf.v2i8.543>
- Folke, C., Carpenter, S. R., Walker, B., Scheffer, M., & Chapin, T. (2010). Resilience thinking: integrating resilience, adaptability and transformability. *Ecology and Society*, 15(4), 20.
- Fonseca, E. L. da. (2004). *Desenvolvimento de modelo da disponibilidade de fitomassa aérea para formações campestres naturais a partir de dados espectrais orbitais e agrometeorológicos* [Instituto Nacional de pesquisas espaciais]. <http://mtc-m12.sid.inpe.br/col/sid.inpe.br/jeferson/2004/07.29.10.58/doc/publicacao.pdf>
- Franzpc. (2017). *Combinación de bandas para Landsat 8*. Acolita. <https://acolita.com/combinacion-de-bandas-para-landsat-8/>
- Galindo Mendoza, M. G., & Casiano Domínguez, M. (2014). *Manual de radiometría de campo para la vigilancia y protección fitosanitaria: Caso de aplicación para HLB* (p. 49). Universidad Autónoma de San Luis Potosí.
- Gallardo, A., & Maestre, F. T. (2008). Métodos geoestadísticos para el análisis de datos ecológicos espacialmente explícitos. In F. Maestre, A. Escudero, & A. Bonet (Eds.), *Introducción al Análisis Espacial de Datos en Ecología y Ciencias Ambientales: Métodos y Aplicaciones* (pp. 215–272). Universidad Rey Juan Carlos.

- García, M. de los Á. (2010). *FIJACIÓN DE CARBONO EN LA BIOMASA ARBÓREA, LA NECROMASA Y EL SUELO DE PLANTACIONES DE Eucalyptus grandis CON DIFERENTES MANEJOS EN VERTISOLES DE LA PROVINCIA DE ENTRE RÍOS*. Universidad Nacional de Córdoba.
- García Villanueva, J. (1994). *Principios físicos de climatología*. Ediciones UNALM.
- Gasparri, N. I., Parmuchi, M. G., Bono, J., Karszenbaum, H., & Montenegro, C. L. (2007). Utilidad de imágenes Landsat 7 ETM+ de diferentes fechas para la estimación de biomasa aérea en bosques subtropicales secos de Argentina. *XII Congreso de La Asociación Española de Teledetección*, 9. Recuperado de: https://www.academia.edu/14746785/Utilidad_de_imágenes_Landsat_7_ETM_de_diferentes_fechas_para_la_estimación_de_biomasa_aérea_en_bosques_subtropicales_secos_de_Argentina
- Gilabert, M. A., Gonzalez-Piqueras, J., & García-haro, J. (1997). Acerca de los índices de vegetación. *Revista de Teledetección*, 8(Diciembre 1997), 1–10.
- Gis&Beers. (2017). *Combinaciones RGB de imágenes satélite Landsat y Sentinel*. Gis&Beers. Recuperado de: <http://www.gisandbeers.com/combinacion-de-imagenes-satelite-landsat-sentinel-rgb/>
- González Aguayo, R. (1994?). *Diccionario de términos SIG*. Instituto de Economía y Geografía (CSIC).
- Heywood, I., Cornelius, S., & Carver, S. (2006). An introduction to geographical information systems. In *Proceedings of the Institution of Civil Engineers - Civil Engineering* (3rd ed.). Person Prentice Hall.
- Holben, B., & Justice, C. (1981). An examination of spectral band ratioing to reduce the topographic effect on remotely sensed data. *International Journal of Remote Sensing*, 2(2), 115–133. <https://doi.org/10.1080/01431168108948349>
- Holling, C. (1986). Resilience of ecosystem: local surprise and global change. In W. Clark & R. Munn (Eds.), *Sustainable Development of the Biosphere* (pp. 292–317). Cambridge University Press.
- Holling, C. S. (1992). *Cross-Scale Morphology, Geometry, and*. 62(February), 447–502.
- Holling, C. S., & Gunderson, L. H. (2002). Resilience and Adaptive Cycles. In *Panarchy: Understanding Transformations in Human and Natural Systems*.

- Huete, A. R. (1988). A Soil-Adjusted Vegetation Index (SAVI). *Remote Sensing of Environment*, 25, 295–309.
- Huete, A. R., Liu, H. Q., Batchily, K., & Leeuwen, W. van. (1997). A Comparison of Vegetation Indices over a Global Set of TM Images for EOS-MODIS. *Remote Sensing of Environment*, 59(1997), 440–451.
- Instituto Nacional de Defensa Civil. (2003). Mapa de Cuencas Hidrológicas del Perú [Mapa Hidrológico] Recuperado de <http://sial.segat.gob.pe/mapas/mapa-cuencas-hidrograficas-peru>.
- IPCC. (2013). Preguntas frecuentes Cambio climático 2013 Bases físicas Resumen para responsables de políticas. In *Climate Change 2013: The Physical Science Basis. Contribution of Working Group I to the Fifth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change*.
- Iriondo, J. M., Torres, E., & Escudero, A. (2008). Métodos para analizar variables continuas y categóricas: Correlogramas y estadísticos “ join count .” In F. Maestre, A. Escudero, & A. Bonet (Eds.), *Introducción al Análisis Espacial de Datos en Ecología y Ciencias Ambientales: Métodos y Aplicaciones* (pp. 183–213). Universidad Rey Juan Carlos.
- Kang-tsung, C. (2006). Introduction to Geographic Information Systems, 4th edition. McGraw-Hill, Nueva York, Estados Unidos.
- Kannegieter, A. (1988). Mapping Land-use. In AW Küchler & I. Zonneveld (Eds.), *Vegetation mapping* (pp. 335–374). Kluwer Academic Publishers. <https://doi.org/10.1007/978-94-009-3083-4>
- Kaufman, Y., & Tanré, D. (1992). Atmospherically resistant vegetation index. *IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing*, 30(2), 260–271.
- Kross, A., McNairn, H., Lapen, D., Sunohara, M., & Champagne, C. (2015). Assessment of RapidEye vegetation indices for estimation of leaf area index and biomass in corn and soybean crops. *International Journal of Applied Earth Observation and Geoinformation*, 34(1), 235–248. <https://doi.org/10.1016/j.jag.2014.08.002>
- Küchler, A. (1988). The nature of Vegetation. In A. W. Küchler & I. S. Zonneveld (Eds.), *Vegetation mapping* (pp. 13–24). Springer Netherlands. <https://doi.org/10.1007/978-94-009-3083-4>

- Küchler, A. (1988a). Aspects of maps. In A. W. Küchler & I. S. Zonneveld (Eds.), *Vegetation mapping* (pp. 97–104). Springer Netherlands. <https://doi.org/10.1007/978-94-009-3083-4>
- Küchler, A. (1988b). Boundaries, Transitions and Continua. In A. W. Küchler & I. S. Zonneveld (Eds.), *Vegetation mapping* (pp. 105–110). Springer Netherlands. <https://doi.org/10.1007/978-94-009-3083-4>
- Küchler, A. (1988c). Mapping Herbaceous Vegetation. In A. W. Küchler & I. S. Zonneveld (Eds.), *Vegetation mapping* (pp. 317–321). Springer Netherlands. <https://doi.org/10.1007/978-94-009-3083-4>
- Küchler, A. (1988d). Patterns, colors and symbols. In A. W. Küchler & I. S. Zonneveld (Eds.), *Vegetation mapping* (pp. 111–120). Springer Netherlands. <https://doi.org/10.1007/978-94-009-3083-4>
- Küchler, A. (1988e). Physiognomic and structural analysis of Vegetation. In A. W. Küchler & I. S. Zonneveld (Eds.), *Vegetation mapping* (pp. 37–50). Springer Netherlands. <https://doi.org/10.1007/978-94-009-3083-4>
- Küchler, A. & Zonneveld, I. (1988). Floristic analysis of vegetation. In A. W. Küchler & I. S. Zonneveld (Eds.), *Vegetation mapping* (pp. 51–66). Springer Netherlands. <https://doi.org/10.1007/978-94-009-3083-4>
- Lamolda Ordoñez, H. (2008). *Estudio de la influencia de las correcciones a imágenes Landsat ETM+ en la obtención de propiedades de cubiertas vegetales*. Universidad Politécnica de Madrid.
- LeClerc, E., Leonard, W. & Clark, A. (1962). *Field plot technique* (2da ed.). Ed., Burgess Publishing Co.
- Learn ArcGIS. (2018). *Valorar las huellas de incendios con imágenes de satélite: Comparar combinaciones de bandas*. ESRI. <https://learn.arcgis.com/es/projects/assess-burn-scars-with-satellite-imagery/lessons/compare-band-combinations.htm>
- Liu, H. Q., & Huete, A. (1995). Feedback based modification of the NDVI to minimize canopy background and atmospheric noise. *IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing*, 33(2), 457–465. <https://doi.org/10.1109/36.377946>
- Llactayo, W., Salcedo, K. & Victoria, E. (2013). Evaluación de la exactitud temática del Mapa de Deforestación. Dirección General de Ordenamiento Territorial (DGOT).

- Longley, P. A., Goodchild, M. F., Maguire, D. J., & Rhind, D. W. (2005). *Geographical Information Systems and Science* (2nd ed.). John Wiley & Sons Ltd.
- López, M. (2017, February 1). *Perú: ¿El 'paquetazo ambiental' cumplió con sus objetivos?* Mongabay Latam. <https://es.mongabay.com/2017/02/paquetazo-peru-ambiente/>
- Loza-Del Carpio, A. & Taype-Huamán, I. (2021). Análisis multitemporal de asociaciones vegetales y cambios de uso del suelo en una localidad altoandina, Puno-Perú. *Revista Uniciencia* 35(2), 1-19. <https://doi.org/10.15359/ru.35-2.3>.
- Lupus Madrid. (2016). *Paraguas, sombrillas y solbrillas: ¿protegen de la luz UV? (figura)*. Lupus Madrid. <http://lupusmadrid.com/2016/05/28/protegen-paraguas-luz-ultravioleta-sombrillas-solbrillas/>
- Mancebo Quintana, S., Ortega Pérez, E., Valentín Criado, C., Martín Ramos, B. & Martín Fernández, L. (2008). *LibroSIG: aprendiendo a manejar los SIG en la gestión ambiental*. Madrid.
- Margalef, R. (1982). *Ecología* (Omega). España.
- Margalef, R. (1993). *Teoría de los sistemas ecológicos* (2nd ed.). Editorial Universidad de Barcelona.
- Marten. (2001). *Ecología Humana: Conceptos Básicos para el Desarrollo Sustentable*. Earthscan Publications. Recuperado de: <http://www.gerrymarten.com/ecologia-humana/indice.html#Contents>
- Matsushita, B., Yang, W., Chen, J., Onda, Y., & Qiu, G. (2007). Sensitivity of the Enhanced Vegetation Index (EVI) and Normalized Difference Vegetation Index (NDVI) to topographic effects. *Sensors*, 7, 2636–2651.
- Matteucci, S. D., & Colma, A. (2002). *Metodología para el estudio de la vegetación* (Issue 22). Secretaría General de la Organización de los Estados Americanos.
- Ministerio del Ambiente (MINAM). (2018). *Guía para la Elaboración de la línea base en el marco del Sistema Nacional de Evaluación del Impacto Ambiental – SEIA*.
- Mueller-Dombois, D., & Ellenberg, H. (1974). *Aims and Methods of Vegetation Ecology*. John Wiley & Sons, Inc.
- Mulder, N. (1988). Digital Image Processing, Computer-aided Classification and Mapping. In AW Küchler & I. Zonneveld (Eds.), *Vegetation mapping* (pp. 269–316). Kluwer

Academic Publishers.

- Nabors, M. W., González-Barreda, P., García Antón, M., & Moreno Sáiz, J. C. (2006). *Introducción a la botánica*. Pearson Addison-Wesley.
- National Aeronautics and Space (NASA). (2015). *Sentinel-2A Launches—Our Compliments & Our Complements*. NASA. <https://landsat.gsfc.nasa.gov/sentinel-2a-launches-our-compliments-our-complements/>
- National Center for Geographic Information and Analysis (NCGIA). (1997). *Fundamental Research in Geographic Information and Analysis*. NCGIA.
- Odum, E. P. (1980). La diversidad como función del flujo de energía. In W. Van Dobben & R. Lowe-McConnell (Eds.), *Conceptos unificados en ecología* (pp. 14–18). Editorial Brume.
- Odum, E. P. (1986). *Fundamentos de ecología* (3rd ed.). Interamericana.
- Olaya, V. (2012). *Sistemas de información geográfica. Tomo I*.
- Ónodi, G., Kertész, M., Kovács-Láng, E., Ódor, P., Botta-Dukát, Z., Lhotsky, B., Barabás, S., Mojzes, A., & Kröel-Dulay, G. (2017). Estimating aboveground herbaceous plant biomass via proxies: The confounding effects of sampling year and precipitation. *Ecological Indicators*, 79(2017), 355–360. <https://doi.org/10.1016/j.ecolind.2017.04.011>
- Orians, H. (1980). Diversidad, estabilidad y madurez en los ecosistemas naturales. In W. Van Dobben & R. Lowe-McConnell (Eds.), *Conceptos unificados en ecología* (pp. 174–189). Editorial Brume.
- Ormeño Villajos, S. (2006). *Teledetección fundamental* (3rd ed.). Universidad Politécnica de Madrid.
- Pareja Paz, J. (1936). El clima del Perú. *Revista de La Universidad Católica*, 5(29), 645–655.
- Peña, J., Bonet, A., & Pastor, E. (2008). Los Sistemas de Información Geográfica y la Ecología Espacial. In F Maestre, A. Escudero, & A. Bonet (Eds.), *Introducción al Análisis Espacial de Datos en Ecología y Ciencias Ambientales: Métodos y Aplicaciones* (pp. 494–541). Editorial DYKINSON.
- Pereda, M. A. (2013). *Comparación de índices de vegetación en zona semiárida de Navarra*

[Universidad pública de Navarra]. <https://academica-e.unavarra.es/handle/2454/7790>

Perez Castellon, E., Ruiz Fonseca, C. J. ç, Reyes Flores, F. G., Lopez Larios, J., & Calero, C. (2005). Potencial de Plantaciones y Fijación de Carbono. *AGRIS*, t.2, 165.

Pérez Gutiérrez, C., & Muñoz Nieto, Á. (2006). *Teledetección: Nociones y aplicaciones*. Universidad de Salamanca. <https://mundocartogeo.files.wordpress.com/2015/03/teledeteccion-nocionesaplicaciones-2006publico.pdf>

Redacción EC. (2019). *Informe El Comercio / IPE | Inversión privada crecería 6,9% este 2019 y 8% en el 2020 | Inversión minera | Economía peruana | Economía | Perú | El Comercio Perú*. El Comercio. <https://elcomercio.pe/economia/peru/ipe-inversion-privada-creceria-6-9-2019-8-2020-inversion-minera-economia-peruana-noticia-613203>

Renda, E., Rozas, M., Moscardini, O. & Torchia, N. (2017). Manual para la elaboración de mapas de riesgo. Ministerio de seguridad de la República Argentina.

Richardson, J. (1977). *Dimensions of Ecology*. Oxford University Press.

Rigler, F. (1980). El concepto de flujo de energía y el flujo de nutrientes entre niveles tróficos. In W. Van Dobben & R. Lowe-McConnell (Eds.), *Conceptos unificados en ecología* (pp. 19–35). Editorial Brume.

Pinedo-Taco, R., Gómez-Pando, L. & Julca-Otiniano, A. (2020). Sostenibilidad ambiental de la producción de quinua (*Chenopodium quinoa* Willd.) en los valles interandinos del Perú. *Ciencia y Tecnología Agropecuaria*, 21(3), e1309. https://doi.org/10.21930/rcta.vol21_num3_art:1309.

Ramos, H. & Tandazo, J. (2018). Sistema de rotación de cultivo de papa en la cuenca del río Vilcanota, en la región Cuzco, Perú. *Journal of science and research: revista ciencia e investigación*, 3(4), pp. 24-33. E-ISSN: 2528-8083.

Rodrigues, C. P., Fontana, D. C., De, O. L. L., Roberti, D. R., Meteorologia, R., & Alegre, P. (2013). *NDVI E FLUXO DE CO 2 EM LAVOURA DE SOJA NO RIO GRANDE DO SUL* Universidade Federal do Rio Grande do Sul (UFRGS), Centro Estadual de Pesquisas em Sensoriamento Universidade Federal de Santa Maria (UFSM), Centro de Ciências Naturais e Exatas , Santa Mari. 95–104.

- Rodríguez Loret, J. & Olivella, R. (2010). Introducción a los sistemas de información geográfica: conceptos y operaciones fundamentales. Universidad Oberta De Catalunya. <http://repositorio.uasb.edu.bo/handle/54000/1230>.
- Rodríguez Pérez, D., Sánchez Carnero, N., Domínguez Gómez, J., & Marta Pastrana, C. (2015). *Cuestiones de teledetección*. Universidad Nacional de Educación a Distancia.
- Rondeaux, G., Steven, M., & Baret, F. (1996). Optimization of soil-adjusted vegetation indices. *Remote Sensing of Environment*, 55(2), 95–107. [https://doi.org/10.1016/0034-4257\(95\)00186-7](https://doi.org/10.1016/0034-4257(95)00186-7)
- Rouse, J. W., Hass, R. H., Schell, J. A., & Deering, D. W. (1973). Monitoring vegetation systems in the great plains with ERTS. *Third Earth Resources Technology Satellite (ERTS) Symposium, 1*, 309–317. <https://doi.org/citeulike-article-id:12009708>
- Sánchez Infantas, E., & Falero Sánchez, M. (2015). ¿a Qué Paradigma De Gestión De La Naturaleza Adscribe La Normativa Peruana Sobre Calidad Ambiental? *Ecología Aplicada*, 14(2), 163–174. <https://doi.org/10.21704/rea.v14i1-2.93>
- Sánchez Infantas, E., & Quinteros Carlos, Z. (2017). Pertinencia Del Concepto De Estándar De Calidad Ambiental (Eca) En La Gestión De Sistemas Ambientales Con Varios Estados Alternativos. Estudio De Caso De Una Experiencia Peruana. *Ecología Aplicada*, 16(2), 151. <https://doi.org/10.21704/rea.v16i2.1019>
- Saste, S. & Sananze, S. (2015). Soil Heterogeneity to Determine Size and Shape of Plots: A Review. *International Journal of Advanced Scientific and Technical Research*, 6(5), 201-209. Recuperado de: <http://www.rpublication.com/ijst/index.html>
- Schirrmann, M., Hamdorf, A., Garz, A., Ustyuzhanin, A., & Dammer, K. H. (2016). Estimating wheat biomass by combining image clustering with crop height. *Computers and Electronics in Agriculture*, 121, 374–384. <https://doi.org/10.1016/j.compag.2016.01.007>
- Schmidt, H., & Karnieli, A. (2001). Sensitivity of vegetation indices to substrate brightness in hyper-arid. *International Journal of Remote Sensing*, 22(17), 3503–3520.
- Servicio Nacional de Meteorología e hidrología (SENAMHI). (2018). *Datos históricos hidrometereológicos*. SENAMHI. <https://web2.senamhi.gob.pe/?p=descarga-datos-hidrometeorologicos>

- Singh, J., Lauenroth, W., & Steinhorst, R. (1975). Review and Assessment of Various Techniques for Estimating Net Aerial Primary Production in Grasslands from Harvest Data. *Botanical Review*, 41(2), 181–232. Recuperado de: <http://www.jstor.org/stable/4353881> .
- Sobrino, J. A., Raissouni, N., Kerr, Y., Oliosio, A., López-García, M. J., Belaid, A., El Kharraz, M. H., Cuenca, J., & Dempere, L. (2000). *Teledetección* (J. A. Sobrino (Ed.)). Servicio de Publicaciones, Universidad de Valencia. https://books.google.com.pe/books?id=Yb6xIldfoT0C&pg=PA5&lpg=PA5&dq=Sobrino+Teledetección+España:+Servicios+de+publicaciones&source=bl&ots=0SBGxuIJ3o&sig=ACfU3U1g9OSNFHsEys9cMt0BRR_QIY6Cag&hl=es&sa=X&ved=2ahUKEwjboch6rLiAhUGTt8KHWUEBjoQ6AEwA3oECAkQAQ#v=o
- Taiz, L., & Zeiger, E. (2004). *Fisiología Vegetal* (3rd ed.). ARMED EDITORA.
- Tian, F., Brandt, M., Liu, Y. Y., Verger, A., Tagesson, T., Diouf, A. A., Rasmussen, K., Mbow, C., Wang, Y., & Fensholt, R. (2016). Remote sensing of vegetation dynamics in drylands: Evaluating vegetation optical depth (VOD) using AVHRR NDVI and in situ green biomass data over West African Sahel. *Remote Sensing of Environment*, 177(2016), 265–276. <https://doi.org/10.1016/j.rse.2016.02.056>
- Tristan, P. M., Doorn, J. H., & Wainschenker, R. S. (2005). El Problema de Normalización en Súper-Resolución de Imágenes Satelitales. *XI Congreso Argentino de Ciencias de La Computación*, 1–5.
- Tucker, C. J., & Sellers, P. J. (1986). Satellite remote sensing of primary production. *International Journal of Remote Sensing*, 7(11), 1395–1416. <https://doi.org/10.1080/01431168608948944>
- Turner, M., O'Neill, R., Garner, R. & Milne, B. (1989). Effects of changing spatial scale on the analysis of landscape pattern. *Landscape Ecology* 3: 153-163
- U.S. Geological Survey (USGS). (2017a). *Landsat*. USGS. Recuperado de: <https://www.usgs.gov/land-resources/nli/landsat>
- U.S. Geological Survey (USGS). (2017b). *Landsat 8*. USGS. Recuperado de: https://www.usgs.gov/land-resources/nli/landsat/landsat-8?qt-science_support_page_related_con=0#qt-science_support_page_related_con
- U.S. Geological Survey (USGS). (2019). *Landsat Levels of Processing*. USGS. Recuperado

de: <https://www.usgs.gov/land-resources/nli/landsat/landsat-levels-processing>

Universidad de Murcia (UM). (2006). *Interacción de los elementos de la superficie terrestre con la radiación*. Recuperado de:

http://www.um.es/geograf/sigmur/temariohtml/node70_mn.html.

Van der Zee, D., & Huizing, H. (1988). Automated Cartography and Electronic Geographic Information Systems. In AW Küchler & I. Zonneveld (Eds.), *Vegetation mapping* (Vol. 10, pp. 163–190). Kluwer Academic Publishers. <https://doi.org/10.1007/978-94-009-3083-4>

Wing, M. G., & Bettinger, P. (2008). *Geographic Information Systems: Applications in Natural Resource Management* (2nd ed.). Oxford University Press.

Zhu, G., Ju, W., Chen, J. M., & Liu, Y. (2014). A novel Moisture Adjusted Vegetation Index (MAVI) to reduce background reflectance and topographical effects on LAI retrieval. *PLoS ONE*, 9(7), 1–15. <https://doi.org/10.1371/journal.pone.0102560>

Zhu, X., & Liu, D. (2014). Improving forest aboveground biomass estimation using seasonal Landsat NDVI time-series. *ISPRS Journal of Photogrammetry and Remote Sensing*, 2014. <https://doi.org/10.1016/j.isprsjprs.2014.08.014>

Zonneveld, I. (1988). Composition and structure of vegetation. In A. W. Küchler & I. S. Zonneveld (Eds.), *Vegetation mapping* (pp. 25–36). Springer Netherlands. <https://doi.org/10.1007/978-94-009-3083-4>

VIII. ANEXOS

Anexo 1. Ficha para la recolección de biomasa en Campo.

Campo	Código			Fecha			
	Coordenadas (UTM)	E	N	Contenido			
	Parcela	A) B) C)	1 2 3 4 5 6				
	Área de la parcela	m2					
	Formación Vegetal						
	Nº de Bolsas Totales			Observación			
	Peso Bolsa Total	gr.					
	Peso Bruto Total	gr.					
	Peso Neto Total	gr.					
	Dimensiones de la Parcela	cm	cm				
	Dimensiones de la Alícuota	cm	cm	Página		Páginas Alícuota	-

Anexo 2. Etiqueta para la bolsa de la alícuota.

Campo	Código		Parcela	A) B) C)	1 2 3 4 5 6
Alicuota	Peso Bolsas	gr.			
	Peso Bruto	gr.		Nº de Bolsas Totales	
	Peso Neto	gr.		Nº de Bolsa	
				Página Alícuota	

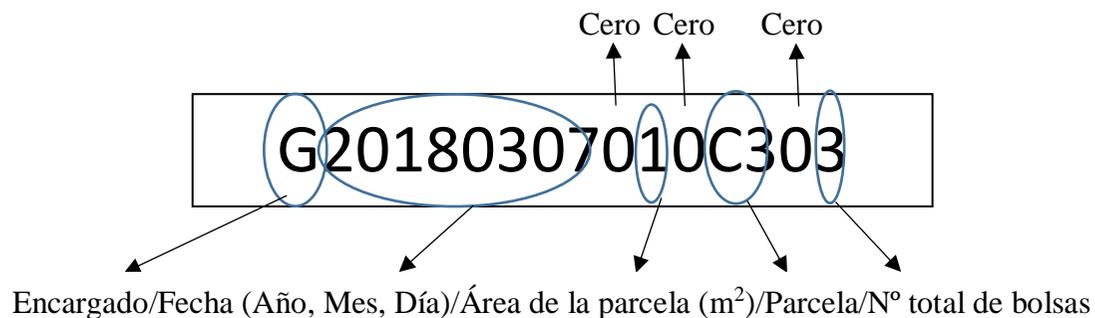
Anexo 3. Ficha para la recolección de los datos en gabinete.

Gabinete	Código		Parcela	A) B) C)	1 2 3 4 5 6
Alicuota	Peso Bolsas	gr.			
	Peso Bruto	gr.	Nº de Bolsas Totales		% Humedad
	Peso Neto	gr.	Nº de Bolsa		Basura
					Página

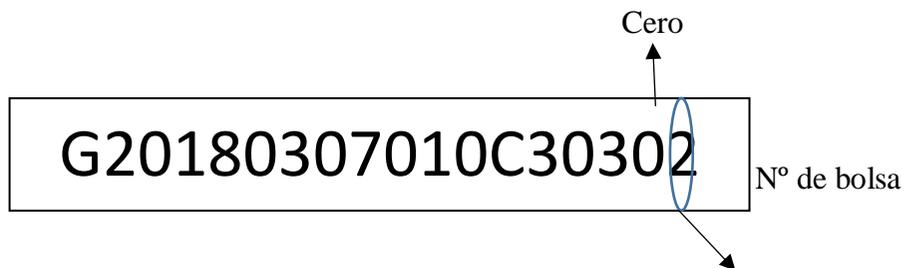
Anexo 4. Ficha informativa para las capacitaciones de los colaboradores en campo y gabinete.

Código: Formado por: la letra inicial SOLO del colector encargado, por ejemplo, G, seguido de la fecha (año, mes, día, con un cero adelante si es de un dígito), seguido de un cero, área de la parcela, seguido de un cero, el código de parcela, seguido de un cero, N° de bolsas totales, seguido de un cero, N° de bolsa.

Código de Campo ejemplo:



Código de campo Alícuota ejemplo



Anexo 5. Propuesta de Clasificación de formas de crecimiento para el distrito de Cajatambo.

Fuente: Ceroni (2018), basado en Küchler y Zonneveld, Perez-Harguindeguy et al., Cleef et al., Salgado-Negret y Anderson.

1. Leñosas

- 1a. Latifoliadas perennifolias: *Alnus, Polylepis, Eucaliptus*.
- 1b. Latifoliadas caudifolias: *Ribes*.
- 1c. Aciculares perennifolias
- 1d. Aciculares caducifolias
- 1e. Áfilas
- 1f. Bejucos

2. Herbáceas

- 2a. Graminoides: Gramíneas sueltas: *Bromus, Poa, Vulpia*.
Macollas: *Agrostis, Camalagrostis, Festuca*.
- 2b. Latifoliadas: Hierbas erectas: *Conyza, Gentianella, Halenia*.
Hierbas postradas: *Lachemilla, Medicago*.
- 2c. Rosetas: Rosetas basales: *Eryngium, Hypochoeris*.
Acantirosulas (rosetas con espinas): *Puya*.
- 2d. Cojines: *Aciachne, Distichia muscoides* Nees & Meyen, *Muhlenbergia, Plantago rigida* Kunth.
- 2e. Trepadoras: *Bomarea, Passiflora*.
- 2f. Parásitas: *Cuscuta*.
- 2g. Epífitas: *Tillandsia usneoides* (L.) L.
- 2h. Brioides: Líquenes, Musgos.

3. Suculentas

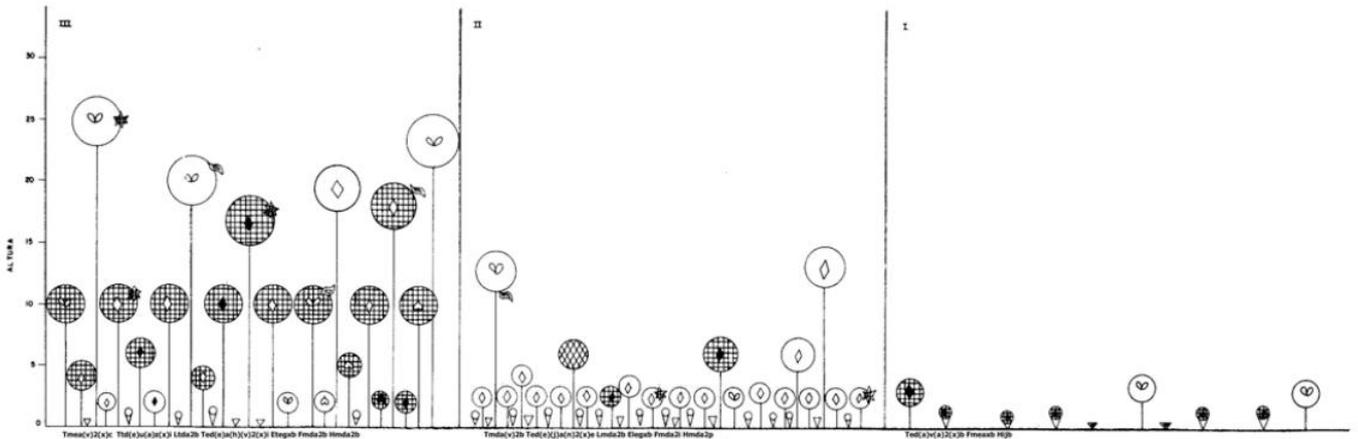
- 3a. De tallo: Ramificados: *Austrocylindropuntia subulata* (Muehlenpf.) Backeb.
Columnares: *Echinopsis*.
Globulares o globosos: *Matucana haynei* (Otto ex Salm-Dyck) Britton & Rose.
Cespitosos: *Austrocylindropuntia floccosa* (Salm-Dyck) F. Ritter.
- 3b. De hoja: Latifoliadas: *Peperomia, Crassula*.
Arrosetadas: *Agave sp.*

Anexo 6. Resumen de los símbolos de las formas de vida basado en Dansereau (1957).

1. Forma de vida principal			2. Tamaño			3. Cobertura		
Árboles o arborea	T		Alto: (T: mínimo 25 m)	t		estéril o muy escasa	b	
Arbustos	F		(F: 2-8 m)					
Hierbas	H		(H: mínimo 8 m)					
Brioides o "Bryoids"	M		Medio: (T: 10-25 m)	m		discontinuo	i	
Epífitas	E		(F, H: 0.5-2 m)					
Lianas	L		(M: mínimo 10 cm)					
			Bajo: (T: 8-10 m)	l		continuo	c	
			(F, H: máximo 50 cm)					
			(M: máximo 10 cm)					
4. Función			5. Forma y tamaño de la Hoja			6. Textura de las hojas		
caduco	d		cicular o aguja o espina	n		pelúcida	f	
semideciduo	s		graminoides	g		membranosa	z	
hojas perennes	e		mediano o pequeño	a		esclerófila	x	
suculento áfilo	j		ancho	h		suculento o fúngica	k	
			compuesto	v				
			talosas (algas)	q				

FUENTE: Küchler & Zonneveld (1988) y Matteucci & Colma (2002).

Anexo 7. Ejemplo de la aplicación del Danserograma.



FUENTE: Matteucci y Colma (2002).

Anexo 8. Sistema de clasificación fisionómica y estructural de la vegetación propuesta por Küchler y Zonneveld (1988).

Categorías básicas de vegetación leñosa

B Perennes de hoja ancha: Las plantas tienen hojas anchas y no están desnudas o sin hojas verdes en cualquier época del año.

D Deciduas de hoja ancha: Las plantas tienen hojas anchas, defolian periódicamente durante una parte del año.

E Perennes aciculares: Las plantas con “hoja en forma de aguja”. También se aplica a hojas que son más parecidas a las escamas en apariencia. Incluye todas las plantas con hojas parecidas a agujas, aunque estas no son coníferas.

N Deciduas aciculares: Las plantas con “hoja en forma de aguja” y defolian periódicamente durante una parte del año.

O Afilas: Las plantas sin hojas. Su clorofila presente en sus tallos y ramas, a menudo son suculentas. Algunas de estas plantas tienen hojas, pero o son muy efímeras o son extremadamente pequeñas, a menudo reducidas a escamas o espinas; en todos estos casos, las hojas juegan un papel insignificante en la fotosíntesis.

M Mixto: El término es restringido. Se limita exclusivamente a una mezcla de hojas perennes aciculares “E” y plantas deciduas de hoja ancha “D”. La combinación de “E” y “D” es muy común, pero para usar la M, es necesario que cada uno de los dos componentes ocupe al menos el 25% del área. Si “D” o “E” no cubren al menos el 25% del área de la comunidad de plantas, las dos letras se registran por separado.

S Semicaducas: Las plantas perennes de hoja ancha “B” y de hoja ancha “D” en las que cada una de ellas ocupa al menos el 25% del área. Este tipo es particularmente importante en los países tropicales y subtropicales.

Categorías de vegetación herbácea básica

G Graminiformes: Plantas herbáceas de hoja angosta. Este término incluye todas las hierbas herbáceas. A estas se les agregan todas las plantas que son de apariencia similar a la hierba a pesar de que no son hierbas en un sentido taxonómico, como juncias, juncos, espadañas y otras. Los bambúes también son pastos, pero están excluidos porque son leñosos.

H Maleza o Latifoliada: Plantas herbáceas de hoja ancha o frondosa. Por lo general son del tipo de floración, Incluye también todos los helechos no epifíticos, excepto los helechos arborescentes. Común en zonas poco densas y su suelo es más o menos permanentemente húmedo.

L Brioides (líquenes y musgo): Incluye todos los musgos y líquenes que crecen en el suelo, ya sean cultivos de suelo o rocas. Los líquenes y musgos epífitos están aquí excluidos.

Categoría de forma de crecimiento especial

C Trepadoras (leñosas): Todas las plantas leñosas que trepan árboles y arbustos. Las trepadoras herbáceas pertenecen a “H”.

K Tallos suculentos: Todas las plantas con tallos carnosos gruesos (suculentos).

T Plantas de penacho: Todas las plantas que consisten en un tronco (a menudo no ramificado) que lleva en su ápice un penacho de hojas, al igual que la mayoría de las palmeras.

V Bambúes: Categoría para todas las clases de bambú. También se aplica a bastones de madera.

X Epífitas: Las plantas que crecen sobre otras plantas.

Características de la hoja

k Suculentas: Las hojas carnosas son siempre llamativas en apariencia, tienen la capacidad de almacenamiento, por lo general ocurren en plantas perennes.

h duras o esclerófilas y w blandas: El grado de dureza de las hojas. Por lo general estas letras se omiten. Las hojas duras, sin embargo, pueden ser importantes. En mapas de escala mediana y pequeña, la letra “w” puede considerarse implícita y no necesita ser utilizada para

describir la vegetación de hoja ancha. Deben indicarse las hojas anchas esclerófilas (Bh).

l Grandes (> 400 cm²) y s Pequeños (< 4 cm²): Solo se indican los tamaños más extremos. Las hojas se consideran de tamaño medio si no se hace referencia en el registro. Cuando se forman diferentes especies de una forma de vida, y tienen hojas de diferentes tamaños, las hojas grandes “l” o pequeñas “s” se registran solo si sus respectivas especies juntas cubren más del 25% de la zona. Para el cálculo del tamaño de la hoja, basta con medir el largo y ancho del limbo de la hoja y multiplicarlo por 2/3.

Clases de altura

La altura de la vegetación leñosa generalmente no presenta ningún problema. Se puede medir o estimar sin dificultad.

- 8 >35 m
- 7 20-35 m
- 6 10-20 m
- 5 5-10 m
- 4 2-5 m
- 3 0,5-2 m
- 2 0,1-0,5 m
- 1 <0,1 m

Clases de cobertura de vegetación

Esta categoría hace referencia al espacio de las plantas en el paisaje.

c Continuo (>75 %): Esto implica un crecimiento continuo, y las plantas a menudo se tocan entre sí.

i Interrumpido (50-75 %): Las plantas están bastante juntas y, a la distancia, pueden dar la apariencia de un crecimiento continuo. Sin embargo, generalmente están espaciados de forma tan amplia que no se tocan. El mapeador no debe confundir la cobertura con las distancias entre árboles. Entre las plantas herbáceas, la letra “i” puede ser especialmente útil en relación con los pastos racimos.

p En parches (25-50 %): La “p” para la vegetación leñosa, significa que los árboles y los arbustos crecen solos o en pequeños bosquecillos. En el caso de la vegetación herbácea, la “p” puede significar parches desconectados.

r Rara (5-25 %): Esto se aplica a las formas de crecimiento que están más dispersas que en “p”.

b Esporádico (1-5 %): La vegetación es muy reducida y el paisaje parece estéril.

a Casi ausente (<1 %): Las formas de crecimiento ahora cubren menos del 1% del área, o la vegetación está ausente. La letra “ap” al final de una fórmula implica que pequeñas parcelas de comunidades vegetales dentro de un paisaje desértico.

Fórmula: Se usarán para registrar las observaciones, en un proceso de combinar y agrupar las diversas letras y símbolos numéricos para producir la descripción más significativa en la forma más breve. La secuencia de la fórmula es: forma de crecimiento – característica y tamaño de la hoja - cobertura – altura. Ejemplo: D7c4rH2pLlr.

La primera letra es de una categoría de “forma de crecimiento”, después la característica y tamaño de la hoja, seguido de una clase de altura, si se adiciona otro número es para indicar la presencia de otra capa o parche de altura separado del primero, en el inmediato siguiente a la clase de altura se indica la categoría de cobertura de esa capa y finalmente la altura de dicha capa o parche.

Anexo 9. Resumen de la clasificación fisionómica y estructural de la vegetación propuesta por Küchler y Zonneveld (1988).

Categorías de formas de crecimiento			
Categorías básicas de vegetación leñosa		Categoría de forma de crecimiento especial	
Siempre verdes o perennes de hoja ancha	B	Trepadoras (leñosas)	C
Deciduas de hoja ancha	D	Tallos suculentos	K
Siempre verdes o perennes aciculares	E	Plantas de penacho	T
Deciduas aciculares	N	Bambúes	V
Afilas	O	Epífitas	X
Mixto (D+E)	M	Características de la hoja	
Semicaducas (B+D)	S	Suculentas	k
Categorías de vegetación herbácea básica		Esclerófilas	h
Graminoides	G	Blandas	w
Latifoliadas	H	Grandes (> 400 cm ²)	l
Brioides (líquenes y musgo)	L	Pequeños (< 4 cm ²)	s
Categorías estructurales			
Altura (Estratificación)		Cobertura	
>35 m	8	>75 %	c
20-35 m	7	50-75 %	i
10-20 m	6	25-50 %	p
5-10 m	5	5-25 %	r
2-5 m	4	1-5 %	b
0,5-2 m	3	<1 %	a
0,1-0,5 m	2		
<0,1 m	1		

Anexo 10. Ficha de registro para el análisis estructural. Fuente: Küchler y Zonneveld (1988).

Ficha de registro para la matriz de Küchler							
Fecha				Página		For. Veg.	
Coordenadas UTM 18S (X, Y)				Altitud		Parcela	Fórmula

	Forma de Vida Clases de altura	Vegetación leñosa						Vegetación herbácea			Crecimiento especial					
		B	D	E	N	O	M	S	G	H	L	C	K	T	V	X
		Perennes de hoja ancha	Deciduas de hoja ancha	Perennes aciculares	Deciduas aciculares	Afilas	Mixto	Semicaducas	Graminiformes	Maleza o Latifoliada	Brioides (líquenes y musgo)	Trepadoras (leñosas)	Tallos suculentos	Plantas de penacho	Bambúes	Epfitas
8	>35 m															
7	20-35 m															
6	10-20 m															
5	5-10 m															
4	2-5 m															
3	0,5-2 m															
2	0,1-0,5 m															
1	<0,1 m															

Cobertura	c = Continuo (>75 %)	i = Interrumpido (50-75 %)	p = En parches (25-50 %)	r = Rara (5-25 %)	b = Esporádico (1-5 %)	a = Casi ausente (<1 %)
Hojas	k = Suculentas	h = duras o esclerófilas	w = blandas	l = Grandes (> 400 cm ²)	s = Pequeños (< 4 cm ²)	

Notas:

Anexo 11. Resultados de las fichas de registros para el análisis estructural

Ficha de registro para la matriz de Küchler									
Fecha	26	4	2018	Página	1	For. Veg.	En proceso de matorrización		
Coordenadas UTM 18S (X,Y)	8843502		278634	Altitud	3196	Parcela	A1	Fórmula	B3pw G2pw K3as3bk L1bws

	Forma de Vida Clases de altura	Vegetación leñosa						Vegetación herbácea			Crecimiento especial					
		B	D	E	N	O	M	S	G	H	L	C	K	T	V	X
		Perennes de hoja ancha	Deciduas de hoja ancha	Perennes aciculares	Deciduas aciculares	Afilas	Mixto	Semicaducas	Graminiformes	Maleza o Latifoliada	Brioides (líquenes y musgo)	Trepadoras (leñosas)	Tallos suculentos	Plantas de penacho	Bambúes	Epífitas
8	>35 m															
7	20-35 m															
6	10-20 m															
5	5-10 m															
4	2-5 m															
3	0,5-2 m	pw											as - bk			
2	0,1-0,5 m								pw							
1	<0,1 m										bws					

Cobertura	c = Continuo (>75 %)	i = Interrumpido (50-75 %)	p = En parches (25-50 %)	r = Rara (5-25 %)	b = Esporádico (1-5 %)	a = Casi ausente (<1 %)
Hojas	k = Suculentas	h = duras o esclerófilas	w = blandas	l = Grandes (>400 cm ²)	s = Pequeños (<4 cm ²)	

Notas:

En B hojas (Ophyosporum) 2x6 cm², 3x6 cm² (Turu), suelo a (< de 1 %)

Pastos 20 cm, r, w, 8x0,5 cm

En K= autrociintropuntia <0,1 / Agave 1,6 m, b,k,l / Mushia auminata =1,6 m, b,h,l (hojas compuestas)

Ficha de registro para la matriz de Küchler									
Fecha	26	4	2018		Página	2	For. Veg.	Matorral	
Coordenadas UTM 18S (X,Y)	8843526			278663	Altitud	3199	Parcela	A2	Fórmula B4rw3cw3rhs G2iw H2pw1pw L1iws K2bhs

Forma de Vida Clases de altura	Vegetación leñosa							Vegetación herbácea			Crecimiento especial					
	B	D	E	N	O	M	S	G	H	L	C	K	T	V	X	
	Perennes de hoja ancha	Deciduas de hoja ancha	Perennes aciculares	Deciduas aciculares	Afilas	Mixto	Semicaducas	Graminiformes	Maleza o Latifoliada	Brioides (líquenes y musgo)	Trepadoras (leñosas)	Tallos suculentos	Plantas de penacho	Bambúes	Epífitas	
8	>35 m															
7	20-35 m															
6	10-20 m															
5	5-10 m															
4	2-5 m	rw														
3	0,5-2 m	cw - rhs														
2	0,1-0,5 m							iw	pw			bhs				
1	<0,1 m								pw	iws						

Cobertura	c = Continuo (>75 %)	i = Interrumpido (50-75 %)	p = En parches (25-50 %)	r = Rara (5-25 %)	b = Esporádico (1-5 %)	a = Casi ausente (<1 %)
Hojas	k = Suculentas	h = duras o esclerófilas	w = blandas	l = Grandes (> 400 cm2)	s = Pequeños (< 4 cm2)	

Notas: B = tecoma 3m / Ophyoporus 1,5m / Hesperoneles 1,5m, s, h / Muhsia acumulata 1,6m, r, h, 12x2,5 cm2 / Baccharis sp. 1,5m b, h, 7x2 cm2 / Warmi Warm 0,8 cm, r, w, s / Calciolaria 0,7m r, w, s
 Salvia oppositiflora 1,2m, r, w, 6x4 cm2 / Baccharis sp. 1m, r, h, s / H = Amor seco 0,3m / Lachemilla <0,1 m / K = Austroclindropuntia 0,4 m / L = Musgo / G = Pasto Poa sp.
 Se hicieron 2 parcelas 1 de 400x100 y otra de 200x100

Ficha de registro para la matriz de Küchler										
Fecha	26	4	2018		Página	3	For. Veg.	Matorral - Pajonal		
Coordenadas UTM 18S (X, Y)	8843079		279219		Altitud	3253	Parcela	A3	Fórmula	B4rw3ih3pw2rws G3ih2rw H3rw2pws1rhs L1rws

	Forma de Vida Clases de altura	Vegetación leñosa						Vegetación herbácea			Crecimiento especial						
		B	D	E	N	O	M	S	G	H	L	C	K	T	V	X	
		Perennes de hoja ancha	Deciduas de hoja ancha	Perennes aciculares	Deciduas aciculares	Afilas	Mixto	Semicaducas	Graminiformes	Maleza o Latifoliada	Brioides (líquenes y musgo)	Trepadoras (leñosas)	Tallos suculentos	Plantas de penacho	Bambúes	Epifitas	
8	>35 m																
7	20-35 m																
6	10-20 m																
5	5-10 m																
4	2-5 m	rw															
3	0,5-2 m	ih s - pw							ih	rw							
2	0,1-0,5 m	rws							rw	pws							
1	<0,1 m									rhs	rws						

Cobertura	c = Continuo (>75 %)	i = Interrumpido (50-75 %)	p = En parches (25-50 %)	r = Rara (5-25 %)	b = Esporádico (1-5 %)	a = Casi ausente (<1 %)
Hojas	k = Suculentas	h = duras o esclerófilas	w = blandas	l = Grandes (> 400 cm ²)	s = Pequeños (< 4 cm ²)	

Notas: *Salvia / Calciolaria / Poa / Muña / Ichu / Amarantacia / Verbenacia sp. / Muhsia acumulata / Gnafalium dembeyanum / Semesio arnaldi / Apiaceae sp. / Baccharos sp.*

B = benesio arnaldii 2,5 / Baccharis sp. 1,7 m / Hesperomeles 2 m / Mutsia accumulata / Salvia opossotiflora 1 m, b, h, s / Calciolaria sp. 0,5 m / Muña 1,5 m p, w, s

G = Poa 0,35 m / Ichu 1 m / H = Gnofalim 1 m, Amarantaceae sp. 0,4 m / Verbena sp. 0,4 m / Apiaceae 20 cm, b, w, 10x3 cm² / NN1 0,1 m Flor blanca

Ficha de registro para la matriz de Küchler										
Fecha	26	4	20181		Página	4	For. Veg.	Herbazales y bosque de eucalipto		
Coordenadas UTM 18S (X, Y)	8842531		280672		Altitud	3314	Parcela	C1	Formula	B7bwl H3bw2cws

	Forma de Vida Clases de altura	Vegetación leñosa						Vegetación herbácea			Crecimiento especial						
		B	D	E	N	O	M	S	G	H	L	C	K	T	V	X	
		Perennes de hoja ancha	Deciduas de hoja ancha	Perennes aciculares	Deciduas aciculares	Afilas	Mixto	Semicaducas	Graminiformes	Maleza o Latifoliada	Brioides (líquenes y musgo)	Trepadoras (leñosas)	Tallos suculentos	Plantas de penacho	Bambúes	Epfitas	
8	>35 m																
7	20-35 m	bwl															
6	10-20 m																
5	5-10 m																
4	2-5 m																
3	0,5-2 m									bw							
2	0,1-0,5 m									cws							
1	<0,1 m																

Cobertura	c = Continuo (>75 %)	i = Interrumpido (50-75 %)	p = En parches (25-50 %)	r = Rara (5-25 %)	b = Esporádico (1-5 %)	a = Casi ausente (<1 %)
Hojas	k = Suculentas	h = duras o esclerófilas	w = blandas	l = Grandes (> 400 cm ²)	s = Pequeños (< 4 cm ²)	

Notas: Hicosmos 0,7 m / Bidens 0,6 m / Tagetes sp. (Huacatay silvestre) 40 cm / Plantago sp. 0,6 cm, p, w, l (amor seco) / Verbena sp. 0,3 cm

Ficha de registro para la matriz de Küchler									
Fecha	27	4	18	Página	5	For. Veg.	Pradera posterior a una quema		
Coordenadas UTM 18S (X, Y)	8842745		280208	Altitud	3320	Parcela	M1	Fórmula	B2bws2bh H2cw L1aws K3bki3ah

	Forma de Vida Clases de altura	Vegetación leñosa						Vegetación herbácea			Crecimiento especial						
		B	D	E	N	O	M	S	G	H	L	C	K	T	V	X	
		Perennes de hoja ancha	Deciduas de hoja ancha	Perennes aciculares	Deciduas aciculares	Afilas	Mixto	Semicaducas	Graminiformes	Maleza o Latifoliada	Brioides (líquenes y musgo)	Trepadoras (leñosas)	Tallos suculentos	Plantas de penacho	Bambúes	Epífitas	
8	>35 m																
7	20-35 m																
6	10-20 m																
5	5-10 m																
4	2-5 m																
3	0,5-2 m												bki - ah				
2	0,1-0,5 m	bws - bh								cw							
1	<0,1 m										aws						

Cobertura	c = Continuo (>75 %)	i = Interrumpido (50-75 %)	p = En parches (25-50 %)	r = Rara (5-25 %)	b = Esporádico (1-5 %)	a = Casi ausente (<1 %)
Hojas	k = Suculentas	h = duras o esclerófilas	w = blandas	l = Grandes (> 400 cm ²)	s = Pequeños (< 4 cm ²)	

Notas: Agabe b 1,2m / Asteraceas c (Bidens) 0,5-0,7m / Lupinus 0,9-1,0m / Musgo 5% a / Cactus (austrocilindripuntia) a 0,5-1,2m / Pastos c, w

Ficha de registro para la matriz de Küchler										
Fecha	27	4	2018		Página	6	For. Veg.	Pradera - Matorral		
Coordenadas UTM 18S (X, Y)	8842728			280101	Altitud	-	Parcela	M2	Fórmula	B3bw H2cws L1iws K3ak

	Forma de Vida Clases de altura	Vegetación leñosa						Vegetación herbácea			Crecimiento especial						
		B	D	E	N	O	M	S	G	H	L	C	K	T	V	X	
		Perennes de hoja ancha	Deciduas de hoja ancha	Perennes aciculares	Deciduas aciculares	Afilas	Mixto	Semicaducas	Graminiformes	Maleza o Latifoliada	Brioides (líquenes y musgo)	Trepadoras (leñosas)	Tallos suculentos	Plantas de penacho	Bambúes	Epífitas	
8	>35 m																
7	20-35 m																
6	10-20 m																
5	5-10 m																
4	2-5 m																
3	0,5-2 m	bw											ak				
2	0,1-0,5 m									cws							
1	<0,1 m										iws						

Cobertura	c = Continuo (>75 %)	i = Interrumpido (50-75 %)	p = En parches (25-50 %)	r = Rara (5-25 %)	b = Esporádico (1-5 %)	a = Casi ausente (<1 %)
Hojas	k = Suculentas	h = duras o esclerófilas	w = blandas	l = Grandes (> 400 cm2)	s = Pequeños (< 4 cm2)	

Notas: Asteraceas (Bidens) c 0,6-0,8 / Verbenacea c 30-35 cm / Pasto c 0,2m / Rocas a / Agabe a 0,8-1,2 / Autrocilendropuntia a 1,2m

Ficha de registro para la matriz de Kùchler										
Fecha	27	4	2018		Página	7	For. Veg.	Pradera - Césped		
Coordenadas UTM 18S (X, Y)	8842720		280274		Altitud	3338	Parcela	C2	Fórmula	H2cw1cw L1aw K3akl

	Forma de Vida Clases de altura	Vegetación leñosa						Vegetación herbácea			Crecimiento especial						
		B	D	E	N	O	M	S	G	H	L	C	K	T	V	X	
		Perennes de hoja ancha	Deciduas de hoja ancha	Perennes aciculares	Deciduas aciculares	Afilas	Mixto	Semicaducas	Graminiformes	Maleza o Latifoliada	Brióides (líquenes y musgo)	Trepadoras (leñosas)	Tallos suculentos	Plantas de penacho	Bambúes	Epífitas	
8	>35 m																
7	20-35 m																
6	10-20 m																
5	5-10 m																
4	2-5 m																
3	0,5-2 m												akl				
2	0,1-0,5 m									cw							
1	<0,1 m									cw	aw						

Cobertura	c = Continuo (>75 %)	i = Interrumpido (50-75 %)	p = En parches (25-50 %)	r = Rara (5-25 %)	b = Esporádico (1-5 %)	a = Casi ausente (<1 %)
Hojas	k = Suculentas	h = duras o esclerófilas	w = blandas	l = Grandes (> 400 cm ²)	s = Pequeños (< 4 cm ²)	

Notas:

Trifoliadas, Pastos

Ficha de registro para la matriz de Küchler										
Fecha	27	4	2018		Página	8	For. Veg.	Matorral - Herbáceo		
Coordenadas UTM 18S (X, Y)	8842329		280932		Altitud	3300 aprox.	Parcela	Max1	Fórmula	G3ph2pwl H3iw

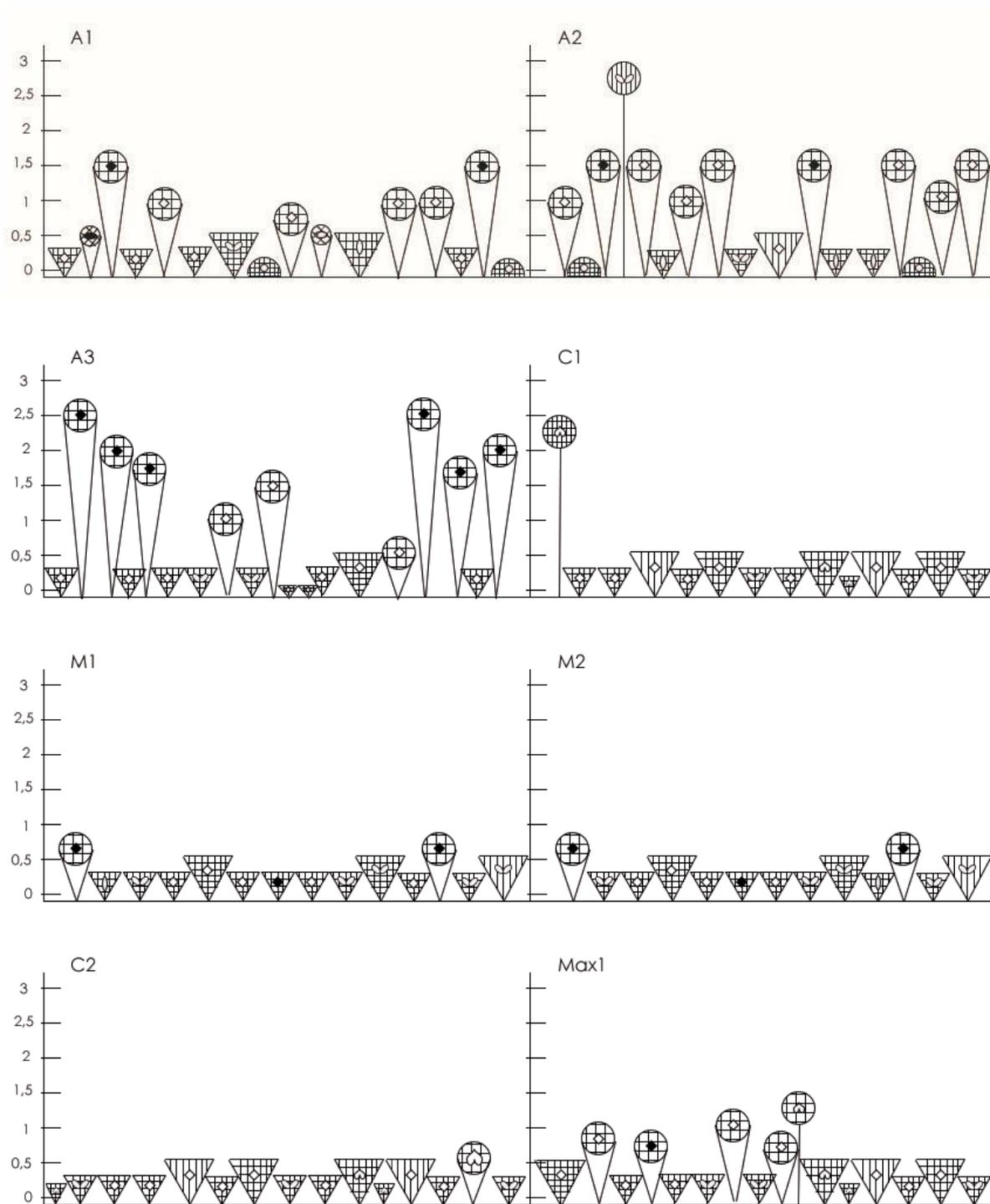
	Forma de Vida Clases de altura	Vegetación leñosa						Vegetación herbácea			Crecimiento especial						
		B	D	E	N	O	M	S	G	H	L	C	K	T	V	X	
		Perennes de hoja ancha	Deciduas de hoja ancha	Perennes aciculares	Deciduas aciculares	Afilas	Mixto	Semicaducas	Graminiformes	Maleza o Latifoliada	Brioides (líquenes y musgo)	Trepadoras (leñosas)	Tallos suculentos	Plantas de penacho	Bambúes	Epifitas	
8	>35 m																
7	20-35 m																
6	10-20 m																
5	5-10 m																
4	2-5 m																
3	0,5-2 m								phl	iw							
2	0,1-0,5 m								pwl								
1	<0,1 m																

Cobertura	c = Continuo (>75 %)	i = Interrumpido (50-75 %)	p = En parches (25-50 %)	r = Rara (5-25 %)	b = Esporádico (1-5 %)	a = Casi ausente (<1 %)
Hojas	k = Suculentas	h = duras o esclerófilas	w = blandas	l = Grandes (> 400 cm ²)	s = Pequeños (< 4 cm ²)	

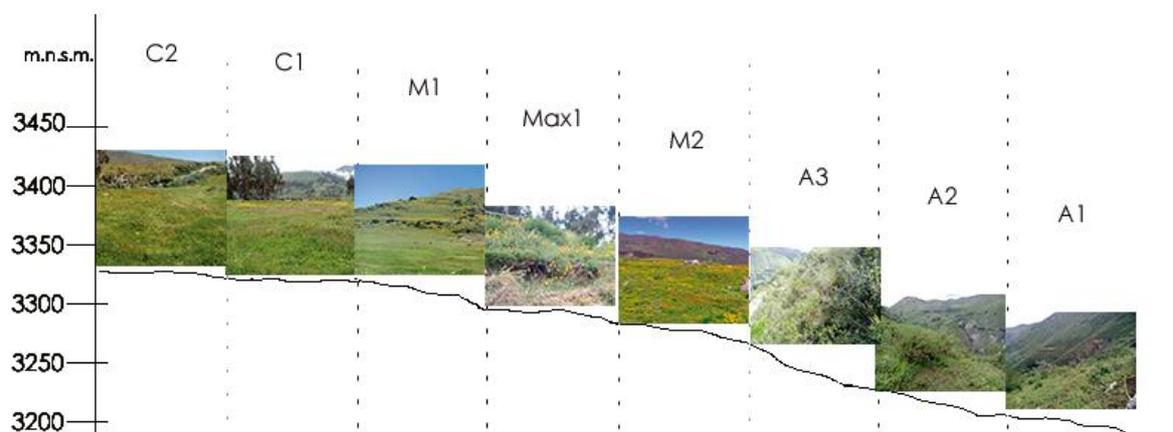
Notas:

Hubo presencia de actividad antrópica (pircas) por el punto de muestreo.

Anexo 12. Resultados de las fichas del Danserograma



Anexo 13. Perfil altitudinal de la vegetación



Anexo 14. Datos de biomasa.

Código	Parcela	Nº de bolsa	Área	Peso Neto Húmedo	Alicuota en campo				Alicuota en gabinete				
					Parcela	Peso bruto	Peso bolsa	Peso Húmedo	Neto	Peso Húmedo Neto	Peso bruto	Peso bolsa	Peso Neto
G20180426010A10201	A1	1	1	2760	800	40	760	1370	308,6	30,75	277,85	404,91	
G20180426010A10202	A1	2			730	120	610		167,85	40,79	127,06		
G20180426020A10201	A1	3	2	1920	500	80	420	1240	162,89	32,08	130,81	382,99	
G20180426020A10202	A1	4			900	80	820		296,99	44,81	252,18		
G20180426040A10401	A1	5			Obs: se sumarán en campo			1000	390,26	31,61	358,65		
G20180426040A10402	A1	6	4	11820	Obs: se sumarán en campo			2600	324,95	39,78	285,17	1165,05	
G20180426040A10403	A1	7			Obs: se sumarán en campo			2600	336,79	42,43	294,36		
G20180426040A10404	A1	8			Obs: se sumarán en campo			2600	267,88	41,01	226,87		
G20180426010A20101	A2	12			-	-	600		115,26	40,21	75,05		
G20180426010A20102	A2	14	1	1370	-	-	310	1370	126,78	43,19	83,59	308,36	
G20180426010A20103	A2	15			-	-	460		187,04	37,32	149,72		
G20180426010A20201	A2	13	2	2490	-	-	690	1650	153,89	45,19	108,7	387,06	
G20180426010A20202	A2	17			-	-	960		316,48	38,12	278,36		
G20180426010A20401	A2	9			-	-	1400		389,88	42,67	347,21		
G20180426010A20402	A2	10	4	6800	-	-	500	4500	297,8	37,02	260,78	1323,50	
G20180426010A20403	A2	11			-	-	1000		379,19	38,4	340,79		
G20180426010A20404	A2	16			-	-	1600		416,07	41,35	374,72		
G20180426010A30101	A3	18	1	950	-	-	650	950	201,15	11,73	189,42	242,26	
G20180426010A30102	A3	23			380	80	300		83,9	31,06	52,84		
G20180426010A30201	A3	22	2	2200	-	-	700	1200	179,11	24,59	154,52	293,41	
G20180426010A30202	A3	39			-	-	500		160,98	22,09	138,89		
G20180426010A30401	A3	19			-	-	550		238,82	37,74	201,08		
G20180426010A30402	A3	20	4	8500	-	-	800	2080	338,78	21,55	317,23	705,92	
G20180426010A30403	A3	21			-	-	730		209,49	21,88	187,61		
G20180426010C10101	C1	24	1	1460	-	-	500	760	102,08	21,23	80,85	123,60	
G20180426010C10102	C1	26			-	-	260		75,43	32,68	42,75		
G20180426010C10202	C1	25	2	2800	-	-	1000	1000	218,58	23,55	195,03	195,03	
G20180427010M10101	M1	28	1	1230	-	-	520	520	161,36	35,74	125,62	125,62	
G20180427010M10201	M1	29	2	2659	-	-	610	610	154,73	20,91	133,82	133,82	
G20180427010M10401	M1	27	4	3640	-	-	800	800	227,39	23,42	203,97	203,97	
G20180427010M20101	M2	31	1	1760	860	20	840	840	248,65	37,43	211,22	211,22	
G20180427010M20201	M2	32	2	2580	-	-	860	860	196,27	22,08	174,19	174,19	
G20180427010M20401	M2	30	4	3940	-	-	1110	1110	288,23	23,67	264,56	264,56	
G20180426010C20101	C2	34	1	1600	-	-	750	750	148,34	35,94	112,4	112,40	
G20180426010C20201	C2	35	2	2200	-	-	1020	1020	171,36	34,62	136,74	136,74	
G20180426010C20401	C2	33	4	6340	-	-	1240	1240	194,82	39,36	155,46	155,46	
G20180427010Max10201	Max1	41	1	3970	-	-	333,62	1333,62	101,61	33,64	67,97	193,33	
G20180427010Max10202	Max1	42			-	-	1000		186,53	61,17	125,36		
G20180427020Max10201	Max1	43	2	5680	-	-	400	1150	140,95	22,18	118,77	275,23	
G20180427020Max10202	Max1	44			-	-	750		178,56	22,1	156,46		
G20180427040Max10404	Max1	36			-	-	800		170,85	23,39	147,46		
G20180427040Max10401	Max1	45			-	-	850		164,87	23,11	141,76		
G20180427040Max10402	Max1	46	4	14570	-	-	1000	3211,12	174,06	22,6	151,46	556,67	
G20180427040Max10403	Max1	47			-	-	561,12		139,63	23,64	115,99		

Anexo 15. Porcentajes de humedad.

Parcela	Tamaño de la parcela		
	1	2	4
A1	70,44	69,11	67,64
A2	77,49	76,54	70,59
A3	74,50	75,55	66,06
C1	83,74	80,50	
M1	75,84	78,06	74,50
M2	74,85	79,75	76,17
C2	85,01	86,59	87,46
Max1	85,50	76,07	82,66

Anexo 16. Datos de los índices de vegetación

Parcela	LANDSAT 30m						
	SAVI	SARVI	OSAVI	NDVI	MAVI	ARVI	EVI
A1	0,333567	0,28638	0,418827	0,717105	0,455025	0,537939	0,327765
A2	0,317212	0,278788	0,41113	0,740272	0,477285	0,570451	0,301806
A3	0,193371	0,164522	0,284073	0,656089	0,421841	0,461128	0,17084
C1	0,371559	0,333342	0,466431	0,801042	0,607458	0,654216	0,3602
M1	0,334761	0,274851	0,407828	0,66827	0,433663	0,473572	0,356394
M2	0,35228	0,290801	0,423929	0,683252	0,455663	0,491443	0,337482
C2	0,505551	0,451768	0,557056	0,804863	0,564301	0,66421	0,555511
Max1	0,415001	0,330048	0,45284	0,647206	0,428907	0,45305	0,440438

Parcela	LANDSAT 15m						
	SAVI	SARVI	OSAVI	NDVI	MAVI	ARVI	EVI
A1	0,475037	0,425397	0,538155	0,802166	0,546198	0,658705	0,490071
A2	0,4658	0,425973	0,540787	0,830795	0,571468	0,702474	0,466278
A3	0,378339	0,349546	0,477789	0,825056	0,584443	0,694795	0,375141
C1	0,526565	0,497532	0,599005	0,898002	0,694793	0,810979	0,529175
M1	0,482742	0,424598	0,53706	0,783721	0,544998	0,630301	0,494809
M2	0,491692	0,431014	0,542553	0,784736	0,553296	0,630865	0,491465
C2	0,629512	0,580625	0,646901	0,868087	0,632687	0,761547	0,693417
Max1	0,462378	0,400412	0,51229	0,744928	0,498633	0,579086	0,470684

SPOT 1,8m						
Parcela	SAVI	SARVI	OSAVI	NDVI	ARVI	EVI
A1	0,168313	0,081903	0,175559	0,239149	0,091542	0,202103
A2	0,242342	0,125138	0,233894	0,296328	0,126615	0,297438
A3	0,194938	0,103768	0,20537	0,282518	0,119036	0,226889
C1	0,216659	0,12049	0,22134	0,295336	0,132011	0,26221
M1	0,253483	0,13886	0,250577	0,324246	0,146298	0,301632
M2	0,221596	0,103504	0,21738	0,279361	0,107107	0,265907
C2	0,329454	0,189527	0,304823	0,37292	0,183821	0,407454
Max1	0,379754	0,236929	0,346173	0,418538	0,226619	0,471549

SPOT 7m						
Parcela	SAVI	SARVI	OSAVI	NDVI	ARVI	EVI
A1	0,20266	0,165889	0,283225	0,586203	0,3852	0,197023
A2	0,217636	0,1566	0,283227	0,513252	0,296041	0,205712
A3	0,178287	0,159719	0,264907	0,629944	0,448403	0,183547
C1	0,145575	0,119369	0,219875	0,544197	0,344259	0,150295
M1	0,247534	0,194356	0,319177	0,569694	0,364295	0,238624
M2	0,224884	0,15221	0,281612	0,483241	0,262894	0,177809
C2	0,398805	0,30734	0,436235	0,624577	0,418885	0,408666
Max1	0,349316	0,252932	0,390329	0,57265	0,35573	0,352375

SENTINEL - 2						
Parcela	ARVI	MAVI	NDVI	OSAVI	SARVI	SAVI
A1	0,499747	0,366875	0,63964	0,639598	0,74968	0,955171
A2	0,415172	0,378455	0,566667	0,566632	0,623056	0,849022
A3	0,324153	0,308471	0,432716	0,432688	0,435965	0,690719
C1	0,556326	0,474993	0,710092	0,710062	0,839881	1,058195
M1	0,482796	0,382032	0,638539	0,638507	0,724941	0,956529
M2	0,543457	0,449503	0,701673	0,701642	0,828586	1,039949
C2	0,645911	0,543708	0,770613	0,770582	0,959617	1,162026
Max1	0,449526	0,401439	0,631895	0,631868	0,714078	0,912294

Anexo 17. Código del *software* R.

```
##Selección de la parcela optima

Par (mfrow = c(2, 2)) #Para dividir el visor Plots

#Ingreso de los Datos de biomasa vegetal

Parcela_1m2 = c(815.73, 308.36,
                242.26,    237.44,
                297.14,    442.56,
                239.79,    575.52)
Parcela_2m2 =
c(593.02,584.11,537.92,546.08,583.32,52
2.57,294.93,1359.40)
Parcela_4m2 =
c(3825.25,1999.96,2884.77, NA,
928.06,939.07,794.85,2525.81)
Nombre = c("A1", "A2", "A3",
           "C1", "M1", "M2", "C2",
           "Max_1")

Data = data.frame(Nombre, Parcela_4m2,
Parcela_2m2, Parcela_1m2)
View(Data)

#Selección

dat1 <- data.frame(Parcela_1m2, Parcela_2m2, Parcela_4m2)
dat1
boxplot(dat1, main = "Peso biomasa vegetal aéreo", xlab="Tamaño de la parcela", ylab="Peso")

Parcela_1m2 = c(815.73, 308.36,
                242.26,    237.44,
                297.14,    442.56,
                239.79,    575.52)
Parcela_2m2 =
c(593.02,584.11,537.92,546.08,583.32,52
2.57,NA, NA)
Parcela_4m2 =
c(3825.25,1999.96,2884.77, NA,
928.06,939.07,794.85,2525.81)

dat2 <- data.frame(Parcela_1m2, Parcela_2m2, Parcela_4m2)
dat2
```

```
boxplot(dat2, main = "Peso biomasa vegetal aéreo", xlab="Tamaño de la parcela", ylab="Peso")
boxplot(Parcela_2m2, main = "Peso biomasa vegetal aéreo Parcela 2m2", ylab="Peso")

coef_var <- function(x, na.rm = FALSE)
{sd(x, na.rm=na.rm) / mean(x, na.rm=na.rm)}

P1= coef_var(x=Parcela_1m2, na.rm=T)
P2= coef_var(x=Parcela_2m2, na.rm=T)
P3= coef_var(x=Parcela_4m2, na.rm=T)

P = c(1,2,4)

Coef = c(P1, P2, P3)
Coef
length(Parcelas)

plot(P, Coef, type = "b", main= "Coeficiente de variación y tamaño de parcela", xlab= "Tamaño de la parcela", ylab= "Coeficiente de variación (CV)", xaxt = "n")
axis(1, at = c(1,2,3,4),
      labels = c("Parcela 1m2", "Parcela 2m2", " ", "Parcela 4m2"))

#Estadística descriptiva

mean(Peso) #Media
length(Peso) #Largo de los datos
Fn1= quantile(Peso) #Cuartiles
Fn1

median(Peso) #Mediana
var(Peso) #Varianza
sd(Peso) #Desviación estandar
range (Peso) #Rango
min(Peso) #Mínimo
max(Peso) #Máximo
diff(range(Peso)) #Diferencia de los extremos del rango
IQR(Peso) #Rango intercuartil entre el 25% y 75% de los datos
```

```

summary(Peso)

#Histograma
hist(Peso, main="Histograma de Peso",
      ylab="Frecuencia")

#Gráfica Densidad de Kernel
plot(density(Peso), main="Densidad de
Kernel", ylab="Densidad")

###Análisis de correlación

##Ingreso de los datos

#Para LANDSAT resolución: 30m
SAVI_L30= c(0.333567, 0.317212,
            0.193371, 0.371559,
            0.334761, 0.35228)
SARVI_L30= c(0.28638, 0.278788,
            0.164522, 0.333342,
            0.274851, 0.290801)
OSAVI_L30= c(0.418827, 0.41113,
            0.284073, 0.466431,
            0.407828, 0.423929)
NDVI_L30= c(0.717105, 0.740272,
            0.656089, 0.801042,
            0.66827, 0.683252)
MAVI_L30= c(0.455025, 0.477285,
            0.421841, 0.607458,
            0.433663, 0.455663)
ARVI_L30= c(0.537939, 0.570451,
            0.461128, 0.654216,
            0.473572, 0.491443)
EVI_L30= c(0.327765, 0.301806,
            0.17084, 0.3602,
            0.356394, 0.337482)

#Estadística descriptiva para LANDSAT
resolución: 30m

L30=data.frame(SAVI_L30,
SARVI_L30, OSAVI_L30, NDVI_L30,
MAVI_L30, ARVI_L30, EVI_L30)
summary(L30)
(var_L30= apply(L30,2, var))
(range_L30= apply(L30,2,range))

#Para LANDSAT resolución: 15m
SAVI_L15= c(0.475037, 0.4658,
            0.378339, 0.526565,
            0.482742, 0.491692)
SARVI_L15= c(0.425397, 0.425973,
            0.349546, 0.497532,
            0.424598, 0.431014)
OSAVI_L15= c(0.538155, 0.540787,
            0.477789, 0.599005,
            0.53706, 0.542553)
NDVI_L15= c(0.802166, 0.830795,
            0.825056, 0.898002,
            0.783721, 0.784736)
MAVI_L15= c(0.546198, 0.571468,
            0.584443, 0.694793,
            0.544998, 0.553296)
ARVI_L15= c(0.658705, 0.702474,
            0.694795, 0.810979,
            0.630301, 0.630865)
EVI_L15= c(0.490071, 0.466278,
            0.375141, 0.529175,
            0.494809, 0.491465)

#Estadística descriptiva para LANDSAT
resolución: 15m

L15=data.frame(SAVI_L15,
SARVI_L15, OSAVI_L15, NDVI_L15,
MAVI_L15, ARVI_L15, EVI_L15)
summary(L15)
(var_L15= apply(L15,2, var))
(range_L15= apply(L15,2,range))

#Para SENTINEL

ARVI_S= c(0.499747, 0.415172,
            0.324153, 0.556326,
            0.482796, 0.543457)
MAVI_S= c(0.366875, 0.378455,
            0.308471, 0.474993,
            0.382032, 0.449503)
NDVI_S= c(0.63964, 0.566667,
            0.432716, 0.710092,
            0.638539, 0.701673)
OSAVI_S= c(0.639598, 0.566632,
            0.432688, 0.710062,
            0.638507, 0.701642)
SARVI_S= c(0.74968, 0.623056,
            0.435965, 0.839881,
            0.724941, 0.828586)

```

```
SAVI_S= c(0.955171, 0.849022,
          0.690719, 1.058195,
          0.956529, 1.039949)
```

```
#Estadística descriptiva para SENTINEL
resolución: 10m
```

```
S=data.frame(ARVI_S, MAVI_S,
             NDVI_S, OSAVI_S, SARVI_S,
             SAVI_S)
summary(S)
(var_S= apply(S,2, var))
(range_S= apply(S,2,range))
```

```
#Para SPOT 1.8m
```

```
ARVI_SP1 = c(0.091542, 0.126615,
             0.119036, 0.132011,
             0.146298, 0.107107)
```

```
NDVI_SP1= c(0.239149, 0.296328,
            0.282518, 0.295336,
            0.324246, 0.279361)
```

```
OSAVI_SP1= c(0.175559, 0.233894,
             0.20537, 0.22134,
             0.250577, 0.21738)
```

```
SARVI_SP1= c(0.081903, 0.125138,
             0.103768, 0.12049,
             0.13886, 0.103504)
```

```
SAVI_SP1= c(0.168313, 0.242342,
            0.194938, 0.216659,
            0.253483, 0.221596)
```

```
EVI_SP1= c(0.202103, 0.297438,
           0.226889, 0.26221,
           0.301632, 0.265907)
```

```
#Estadística descriptiva para SPOT reso-
lución: 1.8m
```

```
SP1=data.frame(ARVI_SP1, NDVI_SP1,
              OSAVI_SP1, SARVI_SP1, SAVI_SP1,
              EVI_SP1)
summary(SP1)
(var_SP1= apply(SP1,2, var))
(range_PS1= apply(SP1,2,range))
```

```
#Para SPOT 6.7m
```

```
SAVI_SP7= c(0.20266, 0.217636,
            0.178287, 0.145575,
            0.247534, 0.224884)
```

```
SARVI_SP7= c(0.165889, 0.1566,
             0.159719, 0.119369,
             0.194356, 0.15221)
```

```
OSAVI_SP7= c(0.283225, 0.283227,
            0.264907, 0.219875,
            0.319177, 0.281612)
```

```
NDVI_SP7= c(0.586203, 0.513252,
            0.629944, 0.544197,
            0.569694, 0.483241)
```

```
ARVI_SP7= c(0.3852, 0.296041,
            0.448403, 0.344259,
            0.364295, 0.262894)
```

```
EVI_SP7= c(0.197023, 0.205712,
           0.183547, 0.150295,
           0.238624, 0.177809)
```

```
#Estadística descriptiva para SPOT reso-
lución: 6.7m
```

```
SP7=data.frame(ARVI_SP7, NDVI_SP7,
              OSAVI_SP7, SARVI_SP7, SAVI_SP7,
              EVI_SP7)
```

```
summary(SP7)
(var_SP7= apply(SP7,2, var))
(range_SP7= apply(SP7,2,range))
```

```
#Agrupar las según el IV
```

```
SAVI = data.frame(SAVI_L30,
                 SAVI_L15, SAVI_S, SAVI_SP1,
                 SAVI_SP7)
```

```
SARVI = data.frame(SARVI_L30,
                  SARVI_L15, SARVI_S, SARVI_SP1,
                  SARVI_SP7)
```

```
OSAVI = data.frame(OSAVI_L30,
                  OSAVI_L15, OSAVI_S, OSAVI_SP1,
                  OSAVI_SP7)
```

```
NDVI = data.frame(NDVI_L30,
                  NDVI_L15, NDVI_S, NDVI_SP1,
                  NDVI_SP7)
```

```
MAVI = data.frame(MAVI_L30,
                  MAVI_L15, MAVI_S)
```

```
ARVI = data.frame(ARVI_L30,
                  ARVI_L15, ARVI_S, ARVI_SP1,
                  ARVI_SP7)
```

```
EVI = data.frame(EVI_L30, EVI_L15,
                 EVI_SP1, EVI_SP7)
```

```
###Análisis estadístico
```

```
##Prueba de normalidad de Shapiro-  
WilK
```

```
shapiro.test(Peso)  
apply(SAVI, 2, shapiro.test)  
apply(SARVI, 2, shapiro.test)  
apply(OSAVI, 2, shapiro.test)  
apply(NDVI, 2, shapiro.test)  
apply(MAVI, 2, shapiro.test)  
apply(ARVI, 2, shapiro.test)  
apply(EVI, 2, shapiro.test)
```

```
##Correlación
```

```
#SAVI
```

```
cor(Peso, SAVI)
```

```
cor(Peso, SAVI_L30, method = "spear-  
man")  
cor(Peso, SAVI_L30, method = "ken-  
dall")
```

```
#SARVI
```

```
cor(Peso,SARVI)
```

```
#OSAVI
```

```
cor(Peso,OSAVI)  
cor(Peso, OSAVI_L30, method = "spear-  
man")  
cor(Peso, OSAVI_L30, method = "ken-  
dall")
```

```
#NDVI
```

```
cor(Peso,NDVI)
```

```
#MAVI
```

```
cor(Peso, MAVI_L30, method = "spear-  
man")  
cor(Peso, MAVI_L30, method = "ken-  
dall")  
cor(Peso, MAVI_L15, method = "spear-  
man")  
cor(Peso, MAVI_L15, method = "ken-  
dall")  
cor(Peso,MAVI_S)
```

```
#ARVI
```

```
cor(Peso,ARVI)
```

```
#EVI
```

```
cor(Peso,EVI)
```

```
cor(Peso, EVI_L30, method = "spear-  
man")
```

```
cor(Peso, EVI_L30, method = "kendall")
```

```
##Análisis de la significancia de la corre-  
lacion
```

```
#SAVI
```

```
cor.test(Peso,SAVI_L15)
```

```
cor.test(Peso,SAVI_S)
```

```
cor.test(Peso,SAVI_SP1)
```

```
cor.test(Peso,SAVI_SP7)
```

```
#SARVI
```

```
cor.test(Peso,SARVI_L30)
```

```
cor.test(Peso,SARVI_L15)
```

```
cor.test(Peso,SARVI_S)
```

```
cor.test(Peso,SARVI_SP1)
```

```
cor.test(Peso,SARVI_SP7)
```

```
#OSAVI
```

```
cor.test(Peso,OSAVI_L15)
```

```
cor.test(Peso,OSAVI_S)
```

```
cor.test(Peso,OSAVI_SP1)
```

```
cor.test(Peso,OSAVI_SP7)
```

```
#NDVI
```

```
cor.test(Peso,NDVI_L30)
```

```
cor.test(Peso,NDVI_L15)
```

```
cor.test(Peso,NDVI_S)
```

```
cor.test(Peso,NDVI_SP1)
```

```
cor.test(Peso,NDVI_SP7)
```

```
#MAVI
```

```
cor.test(Peso,MAVI_S)
```

```
#ARVI
```

```
cor.test(Peso,ARVI_L30)
```

```
cor.test(Peso,ARVI_L15)
```

```
cor.test(Peso,ARVI_S)
```

```
cor.test(Peso,ARVI_SP1)
```

```
cor.test(Peso,ARVI_SP7)
```

```
#EVI
```

```
cor.test(Peso,EVI_L15)
```

```

cor.test(Peso,EVI_SP1)
cor.test(Peso,EVI_SP7)

#Coeficiente de determinación

cor(Peso,SAVI)^2
cor(Peso,SARVI)^2
cor(Peso,OSAVI)^2
cor(Peso,NDVI)^2
cor(Peso,MAVI)^2
cor(Peso,ARVI)^2
cor(Peso,EVI)^2

##Análisis de Regresión
#Crear data frame

dat1 <- data.frame(Peso, SAVI_SP7)
dat2 <- data.frame(Peso, SARVI_SP7)
dat3 <- data.frame(Peso, OSAVI_SP7)
dat4 <- data.frame(Peso, MAVI_S)
dat5 <- data.frame(Peso, EVI_SP7)

#Chart Correlation

library(PerformanceAnalytics) #PerformanceAnalytics extensión para graficar correlaciones
chart.Correlation(dat1)
chart.Correlation(dat2)
chart.Correlation(dat3)
chart.Correlation(dat4)
chart.Correlation(dat5)

#Regresión lineal
par(mfrow = c(2, 2)) #Para dividir el visor Plots

reg1 <- lm(Peso ~ SAVI_SP7, data = dat1)
summary(reg1)
anova(reg1)
plot(reg1)

reg2 <- lm(Peso ~ SARVI_SP7, data = dat2)
summary(reg2)
anova(reg2)
plot(reg2)

reg3 <- lm(Peso ~ OSAVI_SP7, data = dat3)
summary(reg3)
anova(reg3)
plot(reg3)

reg4 <- lm(Peso ~ MAVI_S, data = dat4)
summary(reg4)
anova(reg4)
plot(reg4)

reg5 <- lm(Peso ~ EVI_SP7, data = dat5)
summary(reg5)
anova(reg5)
plot(reg5)

#Grafica con ggplot2
library(ggplot2)#ggplot2 es una extension para graficar regresiones

#SAVI_SP7

ggplot(dat1, aes(x=SAVI_SP7, y=Peso))
+
  ggtitle ("Peso vs SAVI_SP7")+
  theme(plot.title = element_text(hjust = 0.5))+
  geom_point(shape=1) +
  geom_smooth(method=lm)+
  geom_label(aes(x = 0.2, y = 250, label = "Peso = 144,87*SAVI + 251,21"),
    label.size = NA, size = 4)+
  geom_label(aes(x = 0.2, y = 240, label = "R-squared: 0,1289"),
    label.size = NA, size = 4)

#SARVI_SP7

ggplot(dat2, aes(x=SARVI_SP7, y=Peso)) +
  ggtitle ("Peso vs SARVI_SP7")+
  theme(plot.title = element_text(hjust = 0.5))+
  geom_point(shape=1) +
  geom_smooth(method=lm)+
  geom_label(aes(x = 0.16, y = 250, label = "Peso = 307,21*SARVI + 232,04"),
    label.size = NA, size = 4)+
  geom_label(aes(x = 0.16, y = 240, label = "R-squared: 0,2565"),

```

```

label.size = NA, size = 4)

#OSAVI_SP7

ggplot(dat3, aes(x=OSAVI_SP7,
y=Peso)) +
  ggtitle ("Peso vs OSAVI_SP7")+
  theme(plot.title = element_text(hjust =
0.5))+
  geom_point(shape=1) +
  geom_smooth(method=lm)+
  geom_label(aes(x = 0.3, y = 250, label =
"Peso = 212,55*OSAVI + 222,06"),
  label.size = NA, size = 4)+
  geom_label(aes(x = 0.3, y = 240, label =
"R-squared: 0,222"),
  label.size = NA, size = 4)

#MAVI_S
ggplot(dat4, aes(x=MAVI_S, y=Peso)) +
  ggtitle ("Peso vs MAVI_S")+
  theme(plot.title = element_text(hjust =
0.5))+
  geom_point(shape=1) +
  geom_smooth(method=lm)+
  geom_label(aes(x = 0.4, y = 250, label =
"Peso = 311,73 - 79,17*MAVI"),
  label.size = NA, size = 4)+
  geom_label(aes(x = 0.4, y = 240, label =
"R-squared: 0.1056"),
  label.size = NA, size = 4)

#EVI_SP7
ggplot(dat5, aes(x=EVI_SP7, y=Peso)) +
  ggtitle ("Peso vs EVI_SP7")+
  theme(plot.title = element_text(hjust =
0.5))+
  geom_point(shape=1) +
  geom_smooth(method=lm)+
  geom_label(aes(x = 0.2, y = 250, label =
"Peso = 327,45*EVI + 217,66"),
  label.size = NA, size = 4)+
  geom_label(aes(x = 0.2, y = 240, label =
"R-squared: 0,4398"),
  label.size = NA, size = 4)

###Prueba sobre los residuos

```

```

#Normalidad de los residuos
shapiro.test(resid(reg1))
shapiro.test(resid(reg2))
shapiro.test(resid(reg3))
shapiro.test(resid(reg4))
shapiro.test(resid(reg5))

#Prueba de heterocedasticidad
# Donde el criterio de decisión es:
Ho=varianzas son constantes
library(car) #Car extensión para la prueba
Score para comprobar la heterocedastici-
dad

#test de Breusch-Pagan se utiliza para de-
terminar la heterocedasticidad en
#un modelo de regresión lineal. Analiza
si la varianza estimada de los residuos
#de una regresión dependen de los valo-
res de las variables independientes.

ncvTest(reg1)
ncvTest(reg2)
ncvTest(reg3)
ncvTest(reg4)
ncvTest(reg5)

# Prueba de independencia de los resi-
duos mediante el test de Durbin-Watson
library(lmtest) #lmtest es una extensión
que contine la función dwtest para la
pueba de Durbin-Watson

dwtest (Peso ~ SAVI_SP7)
dwtest (Peso ~ SARVI_SP7)
dwtest (Peso ~ OSAVI_SP7)
dwtest (Peso ~ MAVI_S)
dwtest (Peso ~ EVI_SP7)

## Raíz del error cuadrático medio
#Valores esperados del peso de la bio-
masa vegetal

SAVI_SP7_e=predict(reg1)[1:6]
SARVI_SP7_e=predict(reg2)[1:6]
OSAVI_SP7_e=predict(reg3)[1:6]
MAVI_S_e=predict(reg4)[1:6]
EVI_SP7_e=predict(reg5)[1:6]

library(Metrics) #Metrics extensión que

```

contine la función para el calculo de
RMSE

#RMSE

rmse(Peso, SAVI_SP7_e)

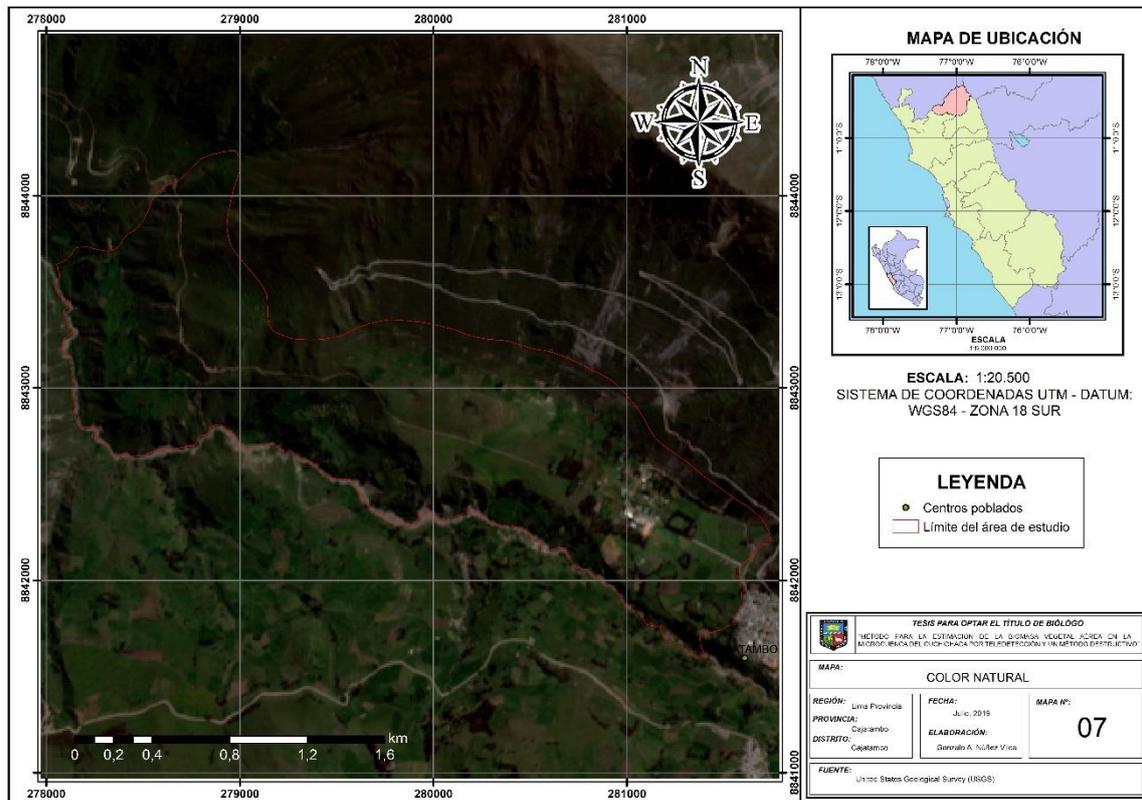
Anexo 18. Mapas en color verdadero y falso color.

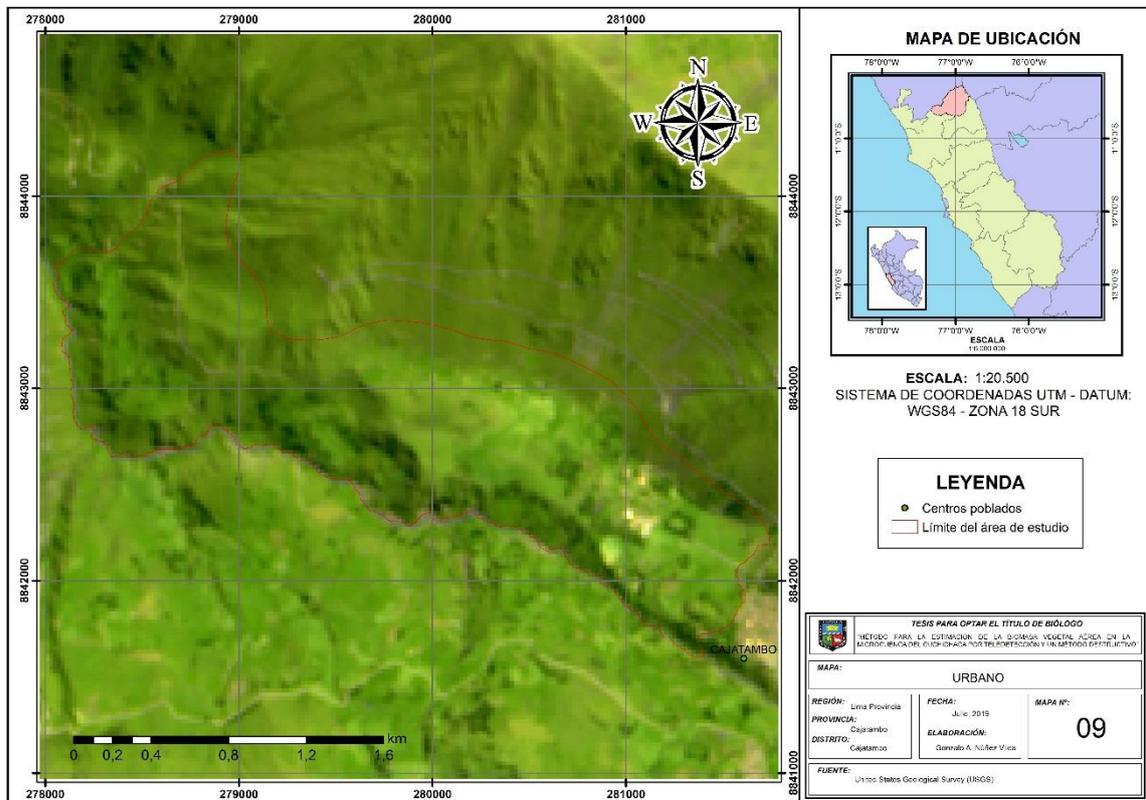
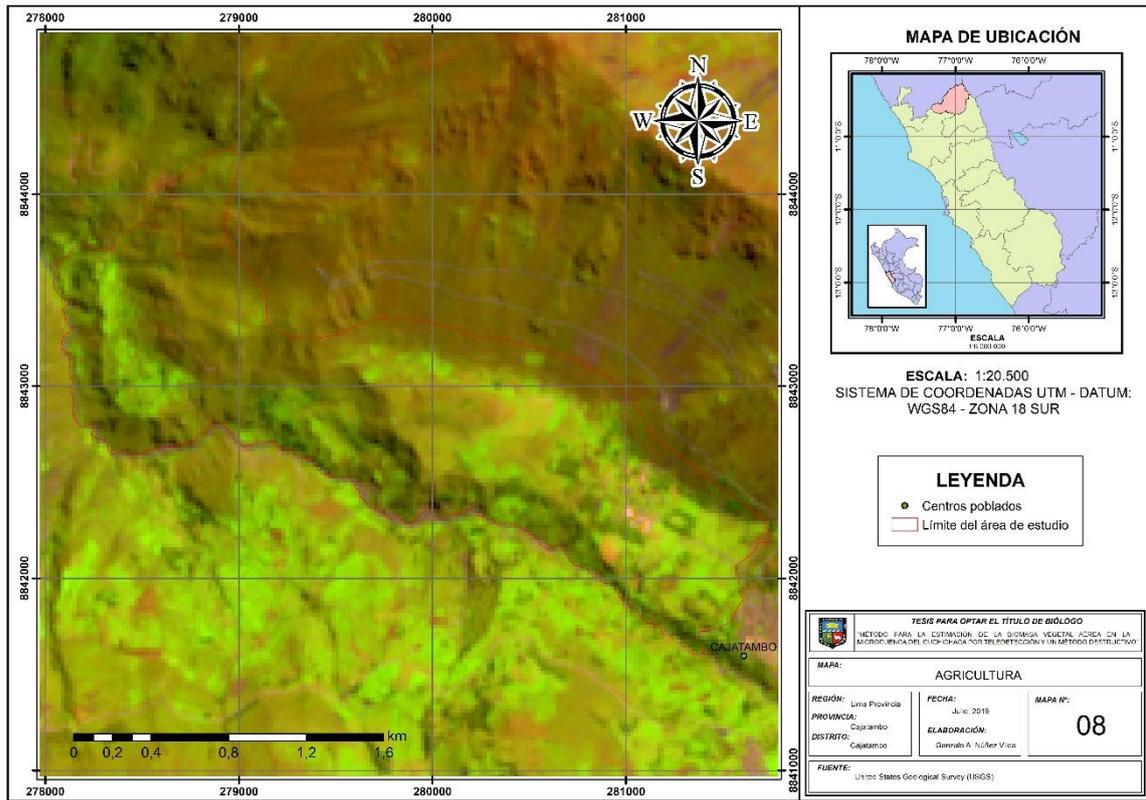
rmse(Peso, SARVI_SP7_e)

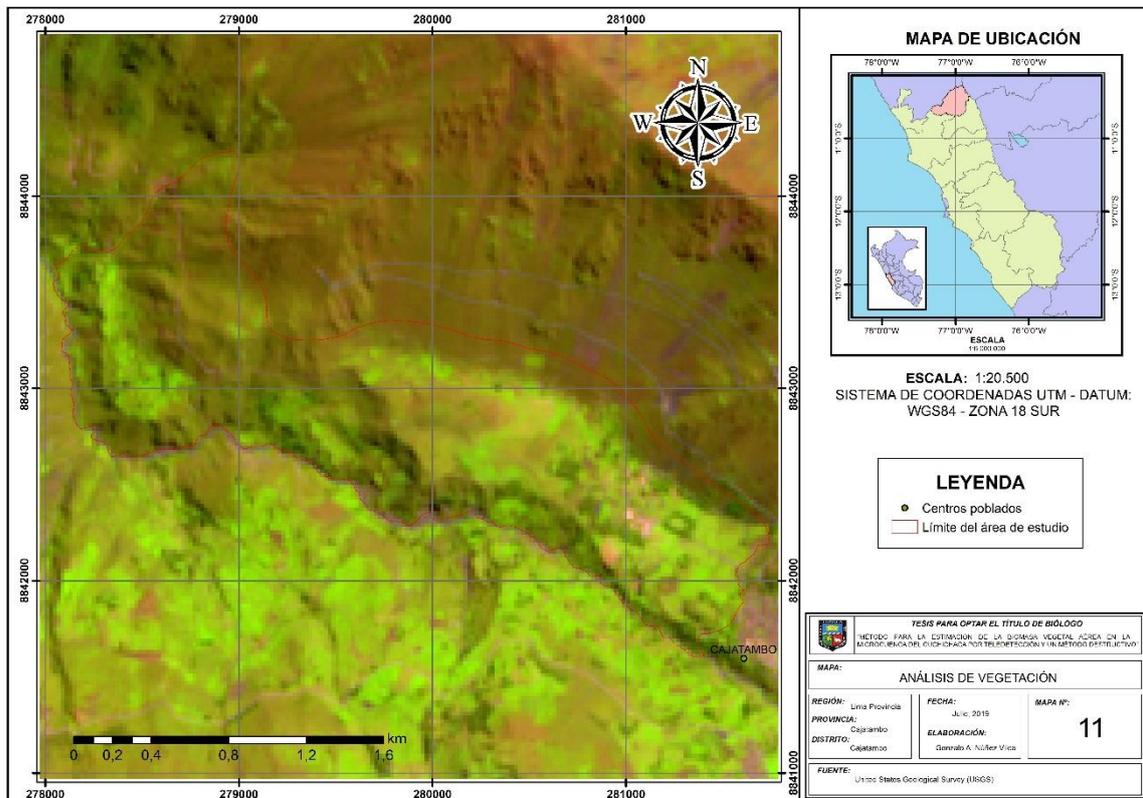
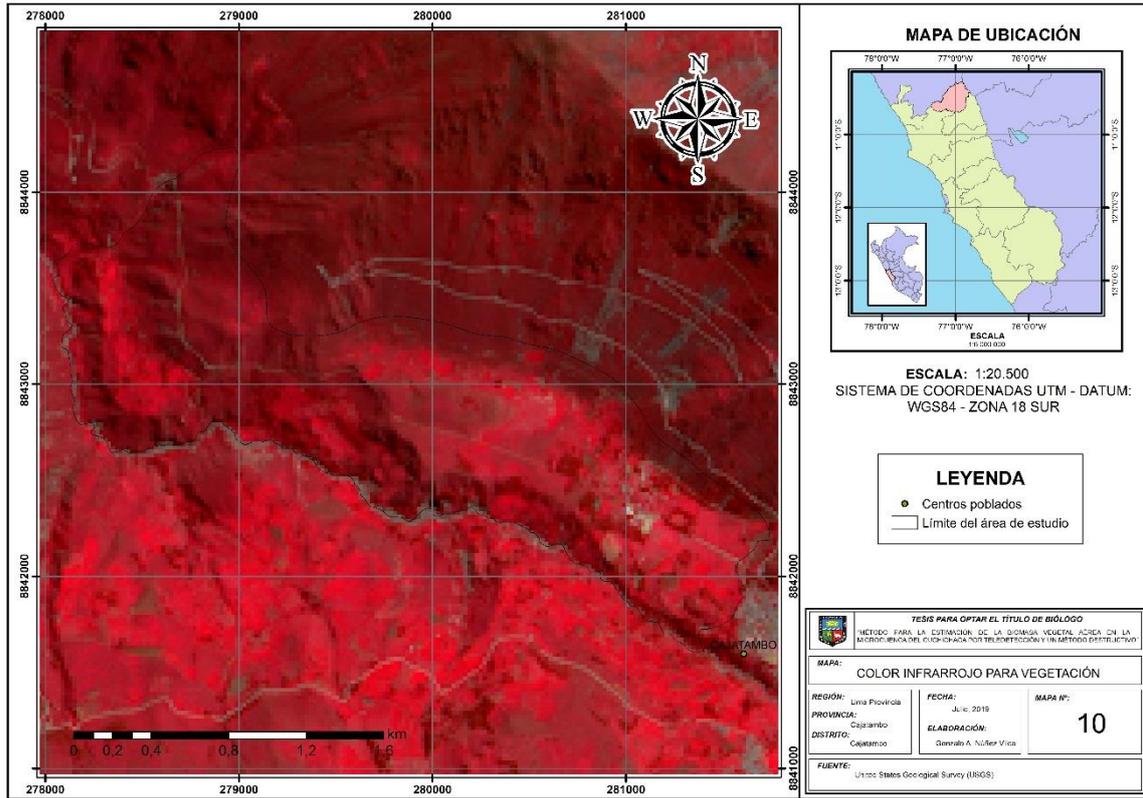
rmse(Peso, OSAVI_SP7_e)

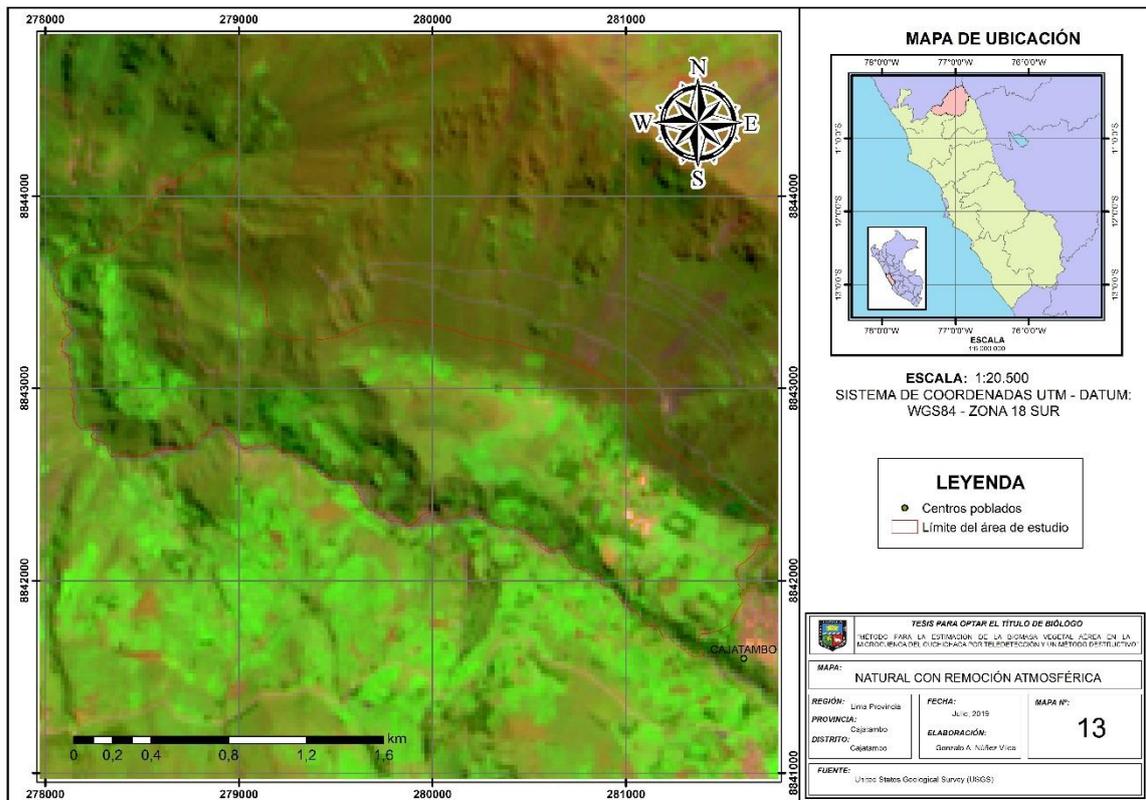
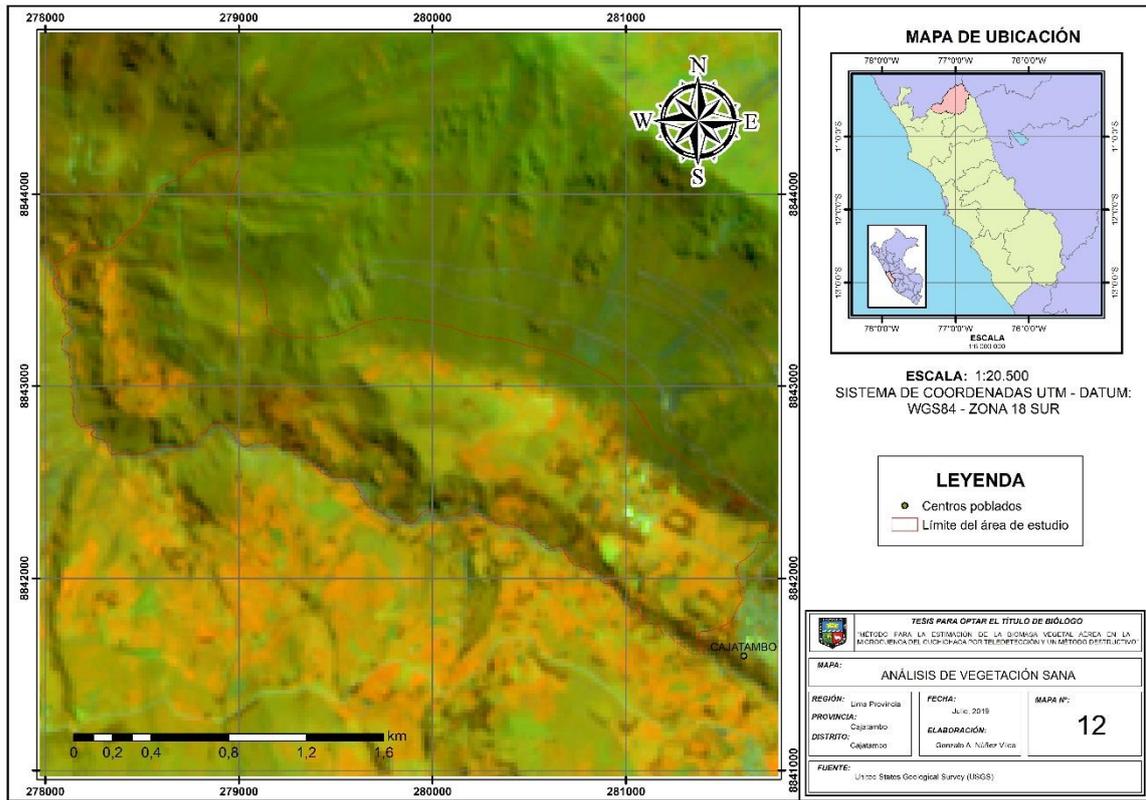
rmse(Peso, MAVI_S_e)

rmse(Peso, EVI_SP7_e)

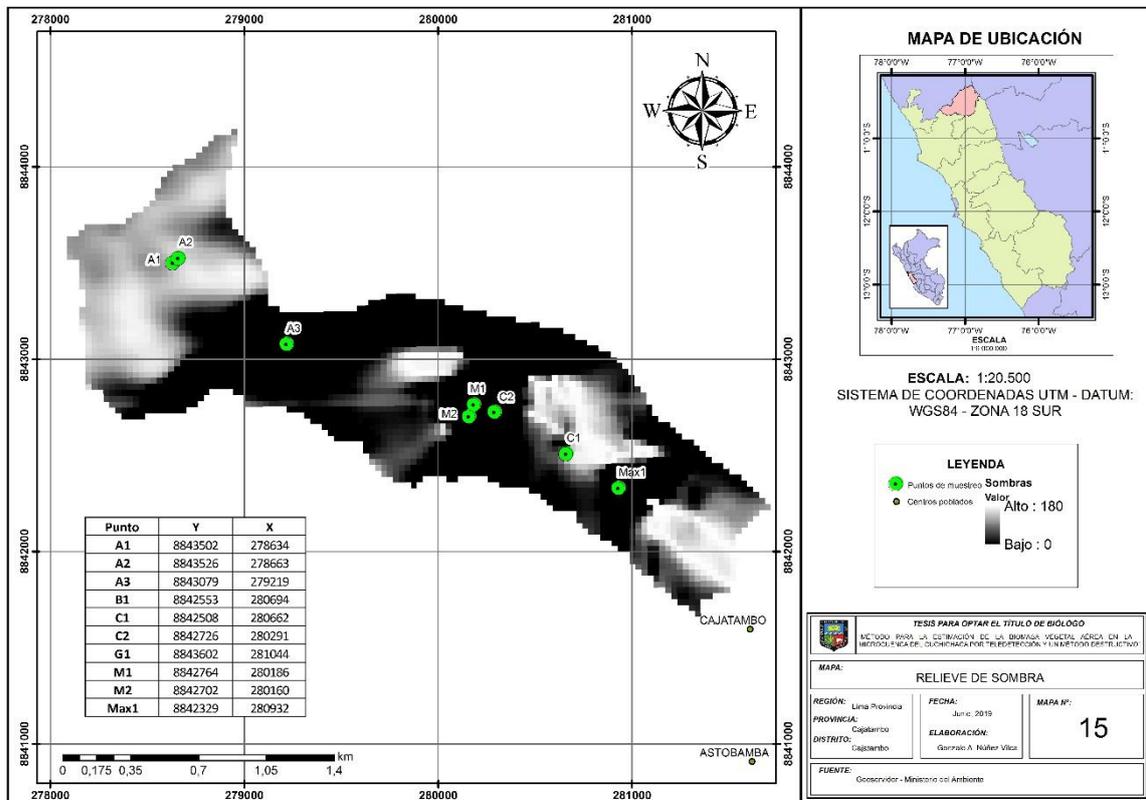
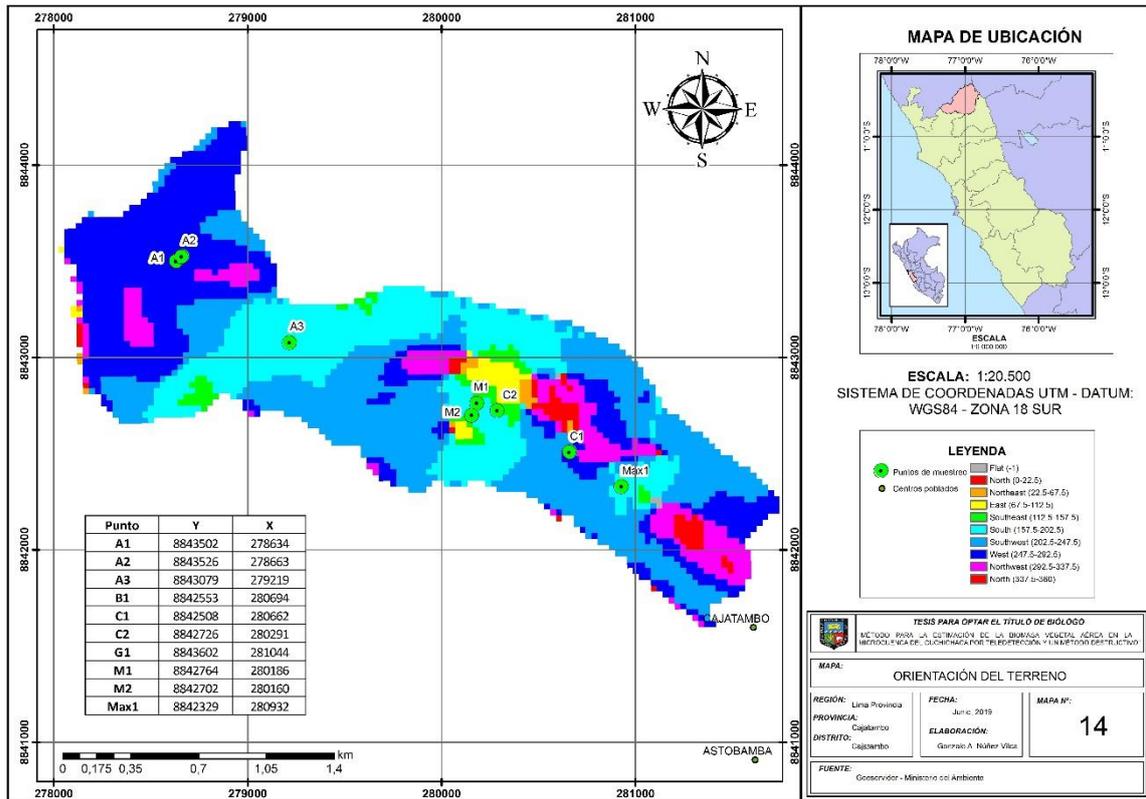


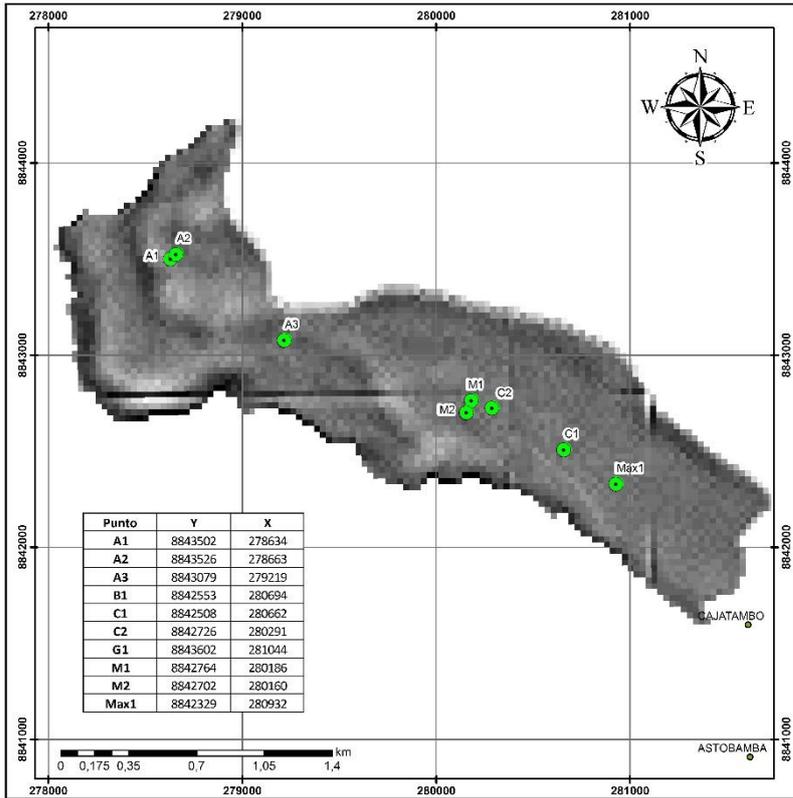






Anexo 19. Mapas auxiliares.





MAPA DE UBICACIÓN

ESCALA: 1:20.500
SISTEMA DE COORDENADAS UTM - DATUM: WGS84 - ZONA 18 SUR

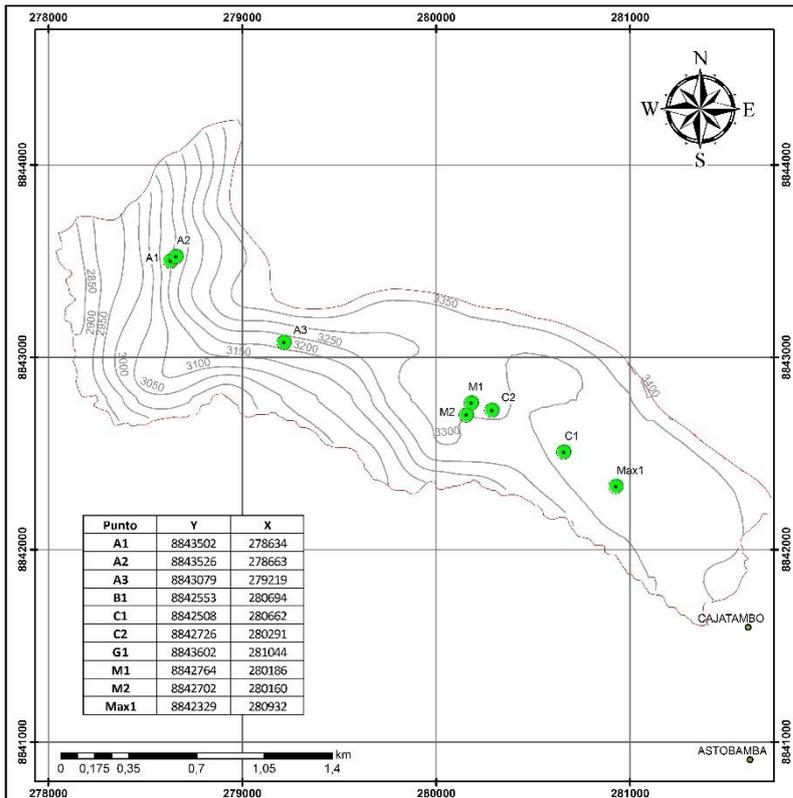
LEYENDA
 ● Puntos de muestreo
 ● Centros poblados
 Valor
 Alto : 5,04817e+010
 Bajo : -4,27153e+010

TESIS PARA OPTAR EL TÍTULO DE BIÓLOGO
 MCT000 RIVERA, A. DESCRIBCIÓN DE LA BIOMASA VEGETAL AGUDA EN LA METROECOLOGÍA DE CUCHIYAMBA POR TELEDETECCIÓN Y UNIMETROECOLOGÍA

MAPA: CURVATURA DEL TERRENO

REGIÓN: Lima Provincia FECHA: Junio 2019 MAPA N°: 16
 PROVINCIA: Cajamarca ELABORACIÓN: GUERRA A. NÚÑEZ VILCA
 DISTRITO: Cuchibambo

FUENTE: Geoservidor - Ministerio del Ambiente



MAPA DE UBICACIÓN

ESCALA: 1:20.500
SISTEMA DE COORDENADAS UTM - DATUM: WGS84 - ZONA 18 SUR

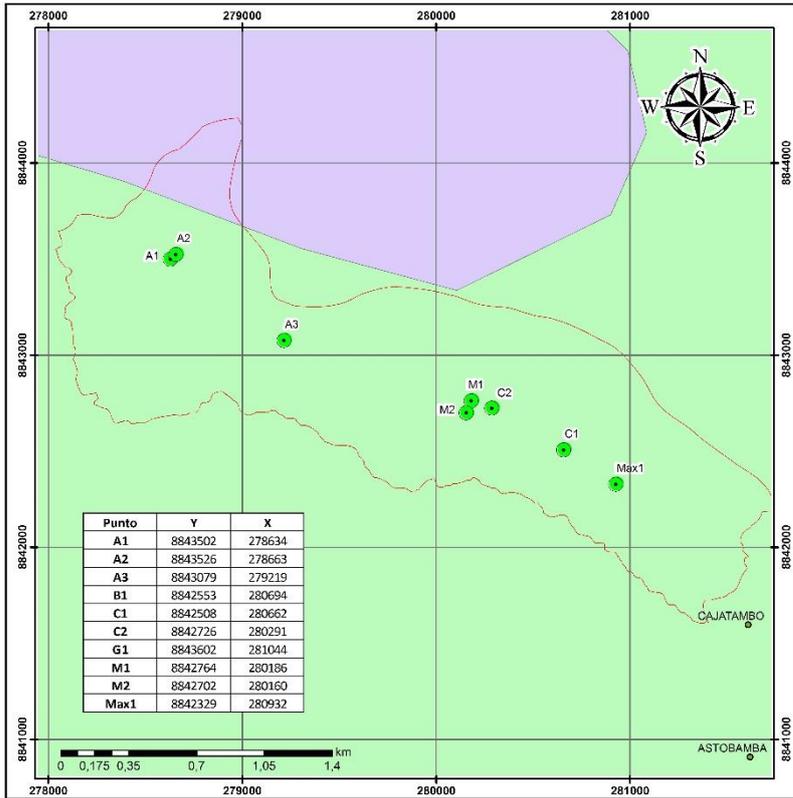
LEYENDA
 ● Puntos de muestreo
 ● Centros poblados
 --- Línea de los datos de estudio
 --- Curvas de nivel

TESIS PARA OPTAR EL TÍTULO DE BIÓLOGO
 MCT000 RIVERA, A. DESCRIBCIÓN DE LA BIOMASA VEGETAL AGUDA EN LA METROECOLOGÍA DE CUCHIYAMBA POR TELEDETECCIÓN Y UNIMETROECOLOGÍA

MAPA: TOPOGRÁFICO

REGIÓN: Lima Provincia FECHA: Junio 2019 MAPA N°: 17
 PROVINCIA: Cajamarca ELABORACIÓN: GUERRA A. NÚÑEZ VILCA
 DISTRITO: Cuchibambo

FUENTE: Geoservidor - Ministerio del Ambiente



MAPA DE UBICACIÓN

ESCALA: 1:20.500
SISTEMA DE COORDENADAS UTM - DATUM: WGS84 - ZONA 18 SUR

LEYENDA

- Puntos de muestreo
- Centros poblados
- Límite del área de estudio
- Cpl.p1 C-12-13
- Cpl.p1 C-13

TESIS PARA OBTENER EL TÍTULO DE BIÓLOGO
MSc. TOSCA BARRA - LA COBERTURA DE LA BIOMASA VEGETAL AGÍCOLA EN LA METEOROLOGÍA DE CAJATAMBO POR TELEDETECCIÓN Y UN MODELO ESTADÍSTICO

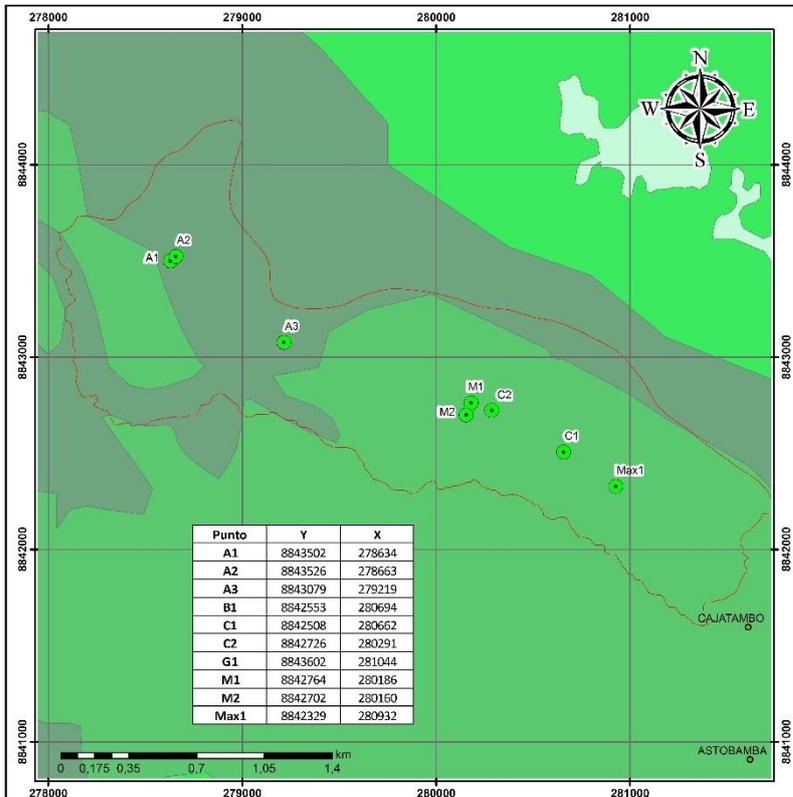
MAPA: CLIMÁTICO

REGIÓN: Lima Provincia FECHA: Jun. 2015 MAPA N°: 18

PROVINCIA: Cajamarca ELABORACIÓN: Gerson A. Muñoz Vilas

DISTRITO: Cajatambo

FUENTE: Gobernador - Ministerio del Ambiente



MAPA DE UBICACIÓN

ESCALA: 1:20.500
SISTEMA DE COORDENADAS UTM - DATUM: WGS84 - ZONA 18 SUR

LEYENDA

- Puntos de muestreo
- Centros poblados
- Límite del área de estudio
- Agricultura costera y andina
- Bosque relicto albañino
- Material albañino
- Pajonal andino

TESIS PARA OBTENER EL TÍTULO DE BIÓLOGO
MSc. TOSCA BARRA - LA COBERTURA DE LA BIOMASA VEGETAL AGÍCOLA EN LA METEOROLOGÍA DE CAJATAMBO POR TELEDETECCIÓN Y UN MODELO ESTADÍSTICO

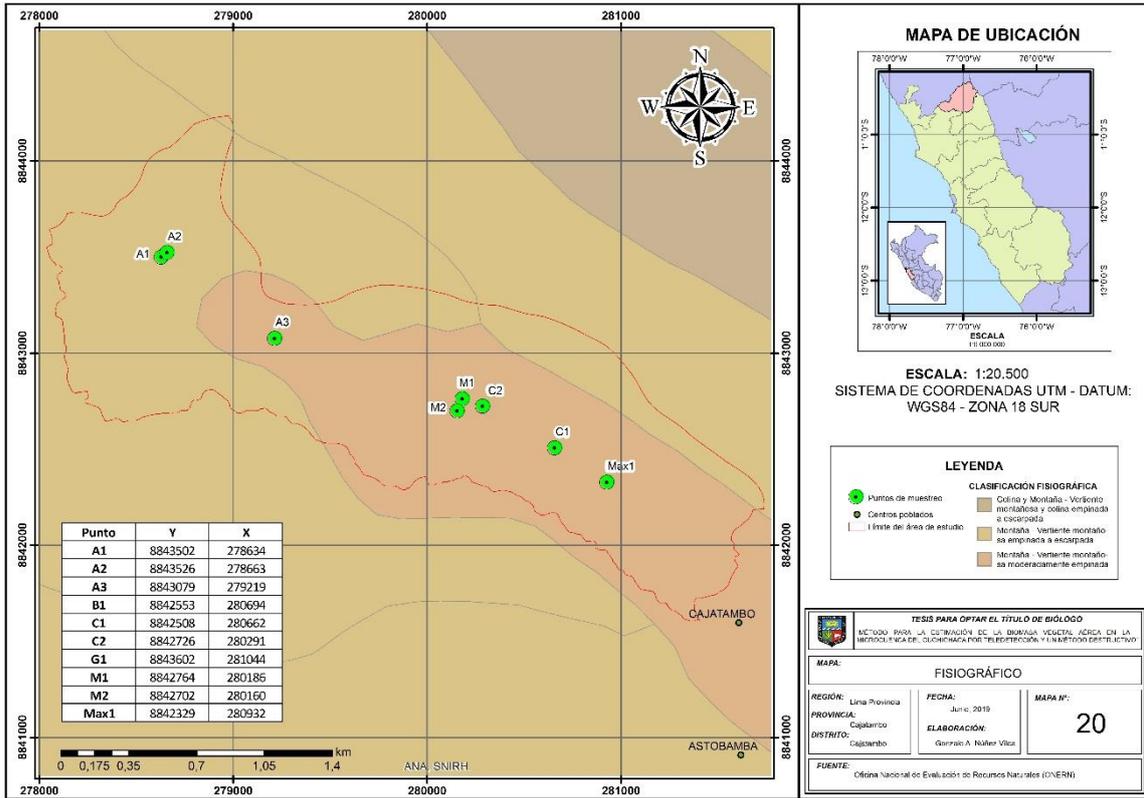
MAPA: COBERTURAS VEGETALES SEGÚN EL MINAM

REGIÓN: Lima Provincia FECHA: Jun. 2015 MAPA N°: 19

PROVINCIA: Cajamarca ELABORACIÓN: Gerson A. Muñoz Vilas

DISTRITO: Cajatambo

FUENTE: Gobernador - Ministerio del Ambiente



Anexo 20. Solicitud de adquisición de la imagen SPOT 6



UNIVERSIDAD NACIONAL AGRARIA LA MOLINA

Teléfono: 614-7800 Fax: 345647 – Apartado 1256 - La Molina-Lima-Perú

SUMILLA: Solicitud de Imágenes satelitales

Lima, 16 de julio de 2018

Señor

Mg. Sc. Barrena Arroyo, Victor Manuel

Profesor principal del Departamento de Manejo Forestal. Facultad de Ciencias Forestales. Laboratorio de Teledetección Aplicada y SIG.

De mi consideración:

Me es grato dirigirme a usted y a la vez solicitarle, en su calidad de representante para la adquisición de imágenes acreditado ante el CONIDA, la adquisición de cuatro (4) imágenes satelitales del Satélite PerúSAT-1, de administración del CONIDA-Ministerio de Defensa del Perú, para la realización del proyecto de investigación “**Descripción del paisaje de alta montaña por teledetección. Estudio de caso: Cajatambo**”, entre los años 2017 y 2018.

En concordancia con lo dispuesto en la Resolución Jefatural N°17-2018-JEINS-CONIDA y en cumplimiento de los lineamientos del Plan operativo institucional, el plan estratégico institucional 2016 – 2019 de UNALM y Facultad de Ciencias, este proyecto se enmarca en la generación y transferencia de conocimientos, producción de investigación básica y aplicada, la capacitación en el uso de nuevas tecnologías, uso y transferencia de tecnologías a la sociedad para contribuir al desarrollo nacional; y del Laboratorio de Ecología de Procesos, para la descripción heurística del paisaje, contribuir en las políticas de prevención de riesgos, políticas de seguridad alimentaria e implementación de nuevas metodologías de investigación en ecosistemas de altamontaña. El proyecto, antes mencionado, se ha propuesto por un grupo de docentes, investigadores y tesisistas, y que a continuación se detalla:

Objetivo del proyecto:

Descripción de los elementos de un paisaje altoandino, realizando una caracterización del paisaje y analizando la escala de estudio óptima, análisis de la cobertura vegetal para zonas agrícolas y aledaños para la gestión del territorio y mitigación de impactos, análisis geomorfológico para la identificación de áreas vulnerables debido a la ocurrencia de fenómenos hidrometeorológicos, cartografiado de la zona de estudio, análisis de cambio de uso de suelo y estudio hidrológico de las subcuencas del Cuchichaca y Pumarrinri para los años 2017 y 2018 usando métodos de teledetección y estudios en campo.

Duración:

Duración aproximada de 6 meses.

Resultados esperados:

- Mapas temáticos de la clasificación de coberturas vegetales.
- Mapas temáticos de índices de vegetación.
- Mapas temáticos de cambio de uso de suelo entre los años 2017 y 2018.



UNIVERSIDAD NACIONAL AGRARIA LA MOLINA

Teléfono: 614-7800 Fax: 345647 – Apartado 1256 - La Molina-Lima-Perú

- Mapas temáticos de la caracterización hidrológica de las subcuencas del Cuchichaca y Pumarrinri.
- Análisis multiescala para la descripción de un paisaje altoandino.
- Cartografías de la geomorfología de la zona de Cajatambo en bases a las imágenes de satélite.
- Mapas temáticos de las áreas de riesgo de fenómenos hidrometeorológicos extremos.
- Mapa temático del modelamiento del nevado "Huayhuash".

Los resultados obtenidos serán presentados en formato de artículos y en tesis. Y publicados en revistas científicas y otros medios de difusión.

Ubicación política del área de estudio:

Distrito de Cajatambo, Provincia de Cajatambo, Región de Lima Provincias, Perú.

Usuarios:

Mg. Sc. Zulema Quinteros Carlos (Docente principal del Departamento de Biología y Jefa del Laboratorio de Ecología de Procesos), Dr. Ever Menacho Casimiro (Docente principal y Jefe del Departamento de Ingeniería Ambiental, Física y Meteorología), y Sr. Gonzalo Núñez Vilca (Investigador del Laboratorio de Ecología de Procesos).

Detalles técnicos:

Área de interés:

Esquina superior izquierda: $77^{\circ} 7' 42,17''$ W $10^{\circ} 19' 30,74''$ S $-77, 130154$ W; $-10, 325850$

Esquina inferior derecha: $76^{\circ} 51' 20,298''$ W $10^{\circ} 34' 15,7''$ S $-76, 854371$ W; $-10, 571497$

Considerando:

Geographic Coordinate System: GCS_WGS_1984

Datum: D_WGS_1984

Prime Meridian: Greenwich

Unit: Degrees Minutes Seconds

Prioridad: Imágenes de archivo.

Tipo de imagen requerida: Satélite: PERUSAT-1.

Procesamiento espectral: Nativa y PANSARPENED.

BANDAS: 4B (3 bandas del color y 1 banda del infrarrojo cercano)

Rango de fechas: Entre el 24 y 28 de abril del 2017 y Entre el 24 y 28 de abril del 2018.

Nivel de procesamiento de imágenes ópticas: Ortorectificación.

Nivel máximo de nubosidad: 5% - 10%.

Modo de adquisición: Mono.

Formato requerido por el usuario: GEOTIFF para PerúSAT-1.

Número total de imágenes: 4: Dos para el año 2017 (Nativa y PANSARPENED) y dos para el año 2018 (Nativa y PANSARPENED).

Campos de aplicación: Agricultura; Recursos naturales e ingeniería; Mapco y gestión de tierra; Descripción de elementos del paisaje.

El grupo de trabajo se compromete en cumplir con los compromisos institucionales adquiridos con el convenio CONIDA-UNALM. A remitir los informes de uso de imágenes, cuando lo considere conveniente.



UNIVERSIDAD NACIONAL AGRARIA LA MOLINA
Teléfono: 614-7800 Fax: 345647 – Apartado 1256 - La Molina-Lima-Perú

El grupo de trabajo ha leído, es consciente y acepta los términos y condiciones de la Licencia de Usuario Final para el Uso de las Imágenes del Sistema Satelital PerúSAT-1 dispuesto en la Resolución Jefatural N°17-2018-JEINS-CONIDA, así como asumiremos las sanciones administrativas, civiles y penales que tuvieran lugar por su incumplimiento. Así como se somete a cualquier disposición adicional, que usted considere conveniente, para garantizar la seguridad y custodia de las imágenes adquiridas.

Por tanto, quedo a usted evaluar y tramitar de lo solicitado.

Sin otro particular, me despido agradeciendo su atención, estamos a la espera de su pronta respuesta.

Mg. Sc. Zulema Quinteros Carlos
Docente principal del Departamento de Biología y Jefa del Laboratorio de Ecología de Procesos

Dr. Ever Menaño Casimiro
Docente principal y Jefe del Departamento de Ingeniería Ambiental, Física y Meteorología

Sr. Gonzalo Núñez Vilca
Tesis Investigador del Laboratorio de Ecología de Procesos.