

**UNIVERSIDAD NACIONAL DE SAN CRISTÓBAL DE HUAMANGA**

**FACULTAD DE INGENIERÍA QUÍMICA Y METALURGIA**

**SECCIÓN DE POSGRADO**

**MAESTRIA: INGENIERÍA AMBIENTAL**



**TESIS**

**EVALUACIÓN DEL IMPACTO DE USO DE SUELOS SEGÚN EL ÍNDICE DE VEGETACIÓN DE DIFERENCIA NORMALIZADA, MEDIANTE IMÁGENES SATELITALES EN EL DISTRITO DE TAMBILLO-AYACUCHO, 2000-2014**

**PRESENTADO POR: Lic. JORGE LUIS LOZANO RODRIGUEZ**

**ASESOR: M.Sc. JORGE GARCIA BLASQUEZ MOROTE**

**PARA OPTAR EL GRADO ACADÉMICO DE MAESTRO EN INGENIERÍA AMBIENTAL**

**AYACUCHO – PERÚ**

**2016**

TM  
Q08  
L03

## ***DEDICATORIA***

*A mi querida esposa Olga y mis hijos, Jorge Antonio y Luis Becker, que son mi apoyo y fortaleza.*

*JORGE.*

## **AGRADECIMIENTO**

*A mi asesor M.Sc. Jorge García Blázquez Marote, por el asesoramiento y continuo apoyo para la realización de la presente investigación.*

*Al Programa de Investigación en Teledetección de la Universidad Nacional Mayor de San Marcos y de la Universidad Nacional de San Cristóbal de Huamanga, dirigidos por el Dr Yoel Rojas Acuña y Walter Mario Solano Reynoso.*

*A los profesionales de la Subgerencia de Recursos Naturales y Gestión del Medio Ambiente del Gobierno Regional de Ayacucho por el apoyo en las capacitaciones en Teledetección Espacial Aplicada a la Zonificación Ecológica y Económica.*

*A mis amigos y colegas del laboratorio de teledetección de la UNSCH, por su incondicional apoyo en el desarrollo del presente trabajo de tesis.*

*Y a todas las personas que de una u otra manera me han apoyado y colaborado con el presente trabajo de tesis.*

*A mi Universidad Nacional de San Cristóbal de Huamanga, mi Alma Mater.*

## ACRÓNIMOS

ARVI	Atmospherically Resistent Vegetation Index
ASTER	Advanced Spaceborne Thermal Emission and Reflection Radiometer
AVHRR	Advanced Very High-Resolution Radiometer
EOS	Earth Observing System
ETM <sup>+</sup>	Enhanced Thematic Mapper Plus
EVI	Enhanced Vegetation Index
FAO	Organización de las Naciones Unidas para la Agricultura y la Alimentación
FOCAM	Fondo de Desarrollo Socioeconómico de Camisea
GRA	Gobierno Regional de Ayacucho
IDL	Interactive Data Lenguaje
LAI	Leaf Area Index
MINAM	Ministerio del Ambiente (Perú)
MODIS	Moderate Resolution Imaging Spectroradiometer
MSI	Índice de Estrés Hídrico
NASA	National Aeronautics and Space Administration
NDVI	Normalized Differential Vegetation Index
NOAA	National Oceanic and Atmospheric Administration
NRVI	Índice de Vegetación Inversamente Proporcional
PVI	Perpendicular Vegetation Index
SAVI	Soil Adjusted Vegetation Index
SENAMHI	Servicio Nacional de Meteorología e Hidrología
TM	Thematic Mapper
TSAVI	Transformed Soil Adjusted Vegetation Index
USGS	United States Geological Survey
UTM	Universal Time Mercator
WSG	World System Geographic
ZEE	Zonificación Ecológica Económica

## ÍNDICE

RESUMEN.....	XI
CAPÍTULO I. INTRODUCCIÓN.....	1
1.1 PLANTEAMIENTO DEL PROBLEMA.....	2
1.2 OBJETIVOS.....	3
1.3 HIPÓTESIS .....	4
CAPÍTULO II. MARCO TEÓRICO.....	5
2.1 ANTECEDENTES.....	5
2.2 FUNDAMENTOS DE LA OBSERVACIÓN REMOTA.....	7
2.3 EL ESPECTRO ELECTROMAGNÉTICO.....	9
2.4 TÉRMINOS Y UNIDADES DE MEDIDA.....	13
2.5 SISTEMAS ESPACIALES DE TELEDETECCIÓN.....	13
2.5.1 Resolución de un sistema sensor.....	16
2.5.2 Características básicas de los sensores remotos.....	16
2.6 DOMINIO ÓPTICO DEL ESPECTRO.....	19
2.7 REFLECTIVIDAD ESPECTRAL DE LA VEGETACIÓN, SUELO, AGUA Y NIEVE.....	21
2.8 EFECTOS ATMOSFÉRICOS SOBRE LA RADIACIÓN.....	22
2.9 PLATAFORMAS DE TELEDETECCIÓN ESPACIAL.....	26
2.9.1 Aplicaciones del sensor MODIS para el monitoreo del territorio.....	27
2.9.2 Especificaciones del sensor MODIS.....	27
2.9.3 Variables biofísicas relacionadas con la vegetación.....	30
2.10 ÍNDICE DE VEGETACIÓN.....	31
2.11 EVALUACIÓN DE SUELOS.....	38
CAPÍTULO III. MATERIALES Y MÉTODOS.....	40
3.1 DESCRIPCIÓN DEL ÁREA GEOGRÁFICA EN ESTUDIO.....	40
3.1.1 Clima.....	41
3.1.2 Biodiversidad.....	41
3.1.3 Geomorfología.....	42
3.1.4 Demografía.....	38
3.1.5 Actividad socioeconómica.....	43
3.1.6 Límites del distrito de Tambillo.....	43
3.1.7 Datos de la estación meteorológica de Tambillo.....	44
3.2 IMÁGENES SATELITALES UTILIZADAS.....	44
3.3 PROCEDIMIENTO A LAS IMÁGENES SATELITALES.....	47
3.3.1 Algoritmo y programas.....	47
3.3.2 Tratamiento digital de las imágenes MODIS Terra.....	47
3.3.3 Selección de muestras de las imágenes descargadas.....	48
3.3.4 Procesamiento de imágenes satelitales MODIS Terra.....	52
3.3.5 Clasificación de la vegetación según el tipo de suelo.....	52

3.4 MÉTODO.....	53
CAPÍTULO IV. RESULTADOS.....	55
4.1 EVOLUCIÓN TEMPORAL DEL NDVI EN EL PERIODO 2000-2014.....	56
4.2 EVOLUCIÓN TEMPORAL DEL ÁREA DE COBERTURA VEGETAL SEGÚN EL NDVI.....	58
4.3 EVOLUCIÓN TEMPORAL DEL TIPO DE COBERTURA VEGETAL POR km <sup>2</sup> .....	60
4.4 VALIDACIÓN DE RESULTADOS CON DATOS NDVI Y ESTACIÓN METEREOLÓGICA....	74
4.5 VALIDACIÓN DE DATOS NDVI-PRECIPITACION DE LA ATMÓSFERA.....	75
4.6 VALIDACIÓN DATOS NDVI-TEMPERATURA DE LA ATMÓSFERA.....	76
CAPÍTULO V. DISCUSIÓN DE RESULTADOS.....	77
CONCLUSIONES.....	80
RECOMENDACIONES.....	81
REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS.....	82
ANEXOS.....	86

## ÍNDICE DE FIGURAS

Figura 2.1 Formas de teledetección.....	8
Figura 2.2 Los componentes eléctricos y magnéticos de la radiación electromagnética.....	9
Figura 2.3 Elementos del sistema de teledetección espacial.....	11
Figura 2.4 El espectro electromagnético con el espectro visible.....	12
Figura 2.5 Concepto de luminosidad y la intensidad radiante.....	15
Figura 2.6 Firmas espectrales típicas de distintas cubiertas.....	18
Figura 2.7 Relación entre flujo incidente, reflejado, transmitido y absorbido.....	19
Figura 2.8 Reflexión regular.....	20
Figura 2.9 Reflexión difusa.....	20
Figura 2.10 Ventanas atmosféricas.....	25
Figura 2.11 Plataforma del satélite artificial Terra.....	26
Figura 2.12 Sistema de escaneo del sensor MODIS.....	28
Figura 2.13 Ángulo de visión del sensor MODIS.....	29
Figura 2.14 Relación de valores de la reflectancia de la banda Infrarroja y roja.....	33
Figura 2.15 Regresión lineal entre la banda roja e infrarroja.....	35
Figura 3.1 Ubicación del área geográfica en estudio, distrito de Tambillo.....	40
Figura 3.2 Vegetación río Niño Yucaes-Muyurina.....	41
Figura 3.3 Matorral semiárido con presencia de cactáceas columnares.....	42
Figura 3.4 Limite político del distrito de Tambillo.....	44
Figura 3.5 Ventana principal de suscripción para descarga.....	45
Figura 3.6 Ubicación de escena a descargar.....	45
Figura 3.7 Ventana de descarga del producto MODIS Terra.....	46
Figura 3.8 Descarga final de imágenes MODIS-Terra.....	46
Figura 3.9 Creación de ventana para corte del área de estudio.....	48
Figura 3.10 Aplicación del software ENVI al apilado y corte de las 341 imágenes.....	51
Figura 3.11 Selección de píxeles en km <sup>2</sup> de la cobertura vegetal.....	52
Figura 4.1 Evolución temporal de tendencia positiva del NDVI por meses del año.....	57
Figura 4.2 Evolución temporal de la cobertura vegetal según el NDVI por estaciones del año.....	59
Figura 4.3 Evolución temporal de la cobertura vegetal del tipo B.....	61
Figura 4.4 Evolución temporal de la cobertura vegetal del tipo C.....	63
Figura 4.5 Evolución temporal de la cobertura vegetal del tipo D.....	65
Figura 4.6 Evolución temporal de la cobertura vegetal del tipo E.....	67

Figura 4.7 Evolución temporal de la cobertura vegetal del tipo F.....	69
Figura 4.8 Evolución temporal de la cobertura vegetal del tipo G.....	71
Figura 4.9 Evolución temporal de la cobertura vegetal del tipo H.....	73
Figura 4.10 Precipitación atmosférica máxima (mm).....	74
Figura 4.11 Temperatura atmosférica máxima y mínima (°C).....	75
Figura 4.12 Relación precipitación atmosférica -NDVI.....	75
Figura 4.13 Relación temperatura atmosférica -NDVI.....	76

## ÍNDICE DE TABLAS

Tabla 2.1 Especificaciones técnicas principales del sensor MODIS.....	29
Tabla 2.2 Índices basados en la pendiente.....	32
Tabla 2.3 Índices basados en la distancia.....	37
Tabla 3.1 Clasificación de la cobertura vegetal.....	53
Tabla 4.1 Datos del NDVI por meses del periodo 2000-2014.....	56
Tabla 4.2 Datos del NDVI por estaciones del periodo 2000-2014.....	58
Tabla 4.3 Datos de área de vegetación tipo B por estaciones periodo 2000-2014.....	60
Tabla 4.4 Datos de área de vegetación tipo C por estaciones periodo 2000-2014.....	62
Tabla 4.5 Datos de área de vegetación tipo D por estaciones periodo 2000-2014.....	64
Tabla 4.6 Datos de área de vegetación tipo E por estaciones periodo 2000-2014.....	66
Tabla 4.7 Datos de área de vegetación tipo F por estaciones periodo 2000-2014.....	68
Tabla 4.8 Datos de área de vegetación tipo G por estaciones periodo 2000-2014.....	70
Tabla 4.9 Datos de área de vegetación tipo H por estaciones periodo 2000-2014.....	72

**ANEXOS**

ANEXO 01 CÓDIGO DE PROCESAMIENTO IDL.....87  
ANEXO 02 DATOS DE PRECIPITACIÓN Y TEMPERATURA ATMOSFÉRICA.....90  
ANEXO 03 IMÁGENES POR ÁREA Y TIPO DE VEGETACIÓN.....92

## RESUMEN

El objetivo del presente trabajo de tesis fue evaluar el impacto de uso de suelos a partir de imágenes satelitales proporcionados por el sensor MODIS (Moderate Resolution Imaging Spectroradiometer), a bordo del satélite Terra para describir y estimar según el Índice de Vegetación de Diferencia Normalizada (NDVI), el comportamiento de la cobertura vegetal.

El NDVI, es un parámetro físico muy importante para estudios de cobertura vegetal. En este sentido, se ha logrado obtener 341 imágenes satelitales MODIS Terra (MOD13Q1) de la página web de la NASA (National Aeronautics and Space Administration) del periodo 2000-2014 con coordenadas geográficas de 13°11'28" latitud sur y 74°06'30" longitud oeste del distrito de Tambillo, con las cuales se hizo un análisis multitemporal del promedio del NDVI de seis escenas durante las estaciones del año, mediante el uso del software ENVI, IDL, ArcGIS y métodos estadísticos, que permitió describir el comportamiento del área de vegetación por tipo de suelo en las estaciones de verano, otoño, invierno y primavera.

Los resultados obtenidos según la variación del área de vegetación: suelo agrícola (NDVI de 0,320 a 0,379), bosques de hoja ancha y perenne (NDVI de 0,380 a 0,439) y prado andino con bosque de hoja perenne (NDVI de 0,440 a 0,500), tienen una línea de tendencia positiva, validadas y estimadas con datos de precipitación y temperatura del aire registrados por la estación meteorológica de Tambillo-Ayacucho.

Los resultados obtenidos servirán como información para mejorar el proceso y clasificación del uso de suelos y elaborar mapas temáticos que contribuyan a la mejor toma de decisiones, según los calendarios agrícolas de cultivos anuales.

**Palabras Claves:** Impacto de uso del suelo, Índice de Vegetación de Diferencia Normalizada, Imágenes satelitales, Tambillo.

## **ABSTRACT**

The objective of this thesis was to evaluate the impact of land use based on satellite images provided by the Moderate Resolution Imaging Spectroradiometer (MODIS) aboard the Terra satellite to describe and estimate according to the Index Normalized Difference Vegetation (NDVI), the of plant cover behavior.

The NDVI is a very important physical parameter for studies of vegetation covering. In this sense, it was managed to get 341 Terra MODIS satellite images (MOD13Q1) of the website NASA (National Aeronautics and Space Administration) in the period 2000 to 2014 with geographical coordinates 13°11'28" South latitude and 74°06'30" West longitude Tambillo district, with which a multi-temporal analysis of average NDVI scenes six seasons, using the software ENVI, IDL, ArcGIS and statistical methods that allowed describing the behavior became length area by soil type vegetation in summer seasons, fall, winter and spring.

The results obtained by varying the area of vegetation, agricultural land (NDVI from 0,320 to 0,379), forests and evergreen broadleaf (NDVI from 0,380 to 0,439) and Andean grassland with evergreen forest (NDVI from 0,440 to 0,500) They have a positive trend line, validated and estimated data of precipitation and air temperature recorded by the meteorological station of Tambillo.

The results serve as feedback to improve the process and classification of land use and produce thematic maps that contribute to better decision making, according to the agricultural calendar of annual crops.

**Keywords:** Impact of land use, Index Normalized Difference Vegetation, satellite images, Tambillo.

# CAPÍTULO I

## INTRODUCCIÓN

El desarrollo de sistemas satelitales para el monitoreo ambiental con el uso de imágenes satelitales a través de la técnica de teledetección espacial en la evaluación del impacto de uso de suelo mediante el Índice de Vegetación de Diferencia Normalizada (NDVI) es amplia; siendo numerosos los estudios realizados a nivel internacional, nacional y regional en los últimos años, pero son escasos los trabajos orientados a resolver los problemas locales dejando muchos vacíos y limitaciones; por lo que es necesario e importante tomar en cuenta los resultados obtenidos en la presente tesis.

La vegetación, es uno de los elementos más notorios del medio físico y también más significativo debido a las múltiples relaciones que mantiene con otros elementos del medio que influye en los procesos morfogenéticos, en el modelado del relieve, en los flujos hídricos; y es uno de los elementos más diferenciadores del paisaje como indicador expresivo y nulo de las interacciones que refleja los cambios de las condiciones climáticas creando microclimas locales que constituye recursos económicos y ecológicos.

La protección del suelo es otra de las importantes funciones de la vegetación, interviniendo en la definición de sus características fisicoquímicas, y en su productividad. La vegetación protege a los animales y es un elemento principal en la estructura de su hábitat. Y finalmente, tal vez la función más importante para la evolución de la vida en el planeta es y será la producción de oxígeno, permitiendo el desarrollo del metabolismo aeróbico.

El presente trabajo de investigación se justifica porque en el distrito de Tambillo, valle de Muyurina, provincia de Huamanga viene ocurriendo una serie de variaciones en el comportamiento dinámico espacio-temporal de la vegetación, como fuente natural de recursos agrícolas y pecuarias, principal sustento económico familiar y comunal, influenciado por el incremento de la población, derivándose ello en un aumento en la demanda de alimentos, por lo que la aplicación de sistemas de información geográfica y teledetección espacial, constituyen herramientas importantes que permitirán la evaluación del impacto de uso de suelo según el índice de vegetación de diferencia normalizada y caracterizar el cambio y evolución de la cobertura vegetal por estaciones

del año. Además el trabajo de tesis se justifica, porque en dicha zona existen recursos naturales y culturales que pueden aprovecharse para la actividad turística organizada, que no colisione con la actividad propia de los habitantes de las zonas, de manera que todas las actividades sociales y económicas se desarrollen de manera sostenible.

El distrito de Tambillo, en los últimos años, tiene la necesidad de aplicar modelos de desarrollo sostenible que se enfoque en establecer políticas de ordenamiento territorial que parte de aspectos básicos como, resolver problemas críticos relacionados con la ocupación y uso agrícola del territorio, y articular a las diversas políticas sectoriales y orientar el accionar del municipio de Tambillo en el cumplimiento eficiente de sus funciones, para el bienestar de sus pobladores y estar en armonía con las condiciones ambientales y la seguridad física.

Según el ZEE de la región Ayacucho, el 80% de los pequeños productores del total de la población del distrito, son considerados como productores de la economía de subsistencia, donde su principal actividad es la agricultura y ganadería, es así que realizan el mal uso de la tierra y malas prácticas agrícolas, que tiene como consecuencia la desertificación y erosión de los suelos agrícolas. Frente a esta problemática del pequeño productor, el distrito de Tambillo fue intervenido por muchas instituciones generadoras de tecnología, que en su mayoría no han podido generar tecnologías adecuadas que permitan incrementar la producción y productividad de los pequeños productores. Las razones son variadas, desde la carencia de políticas institucionales y sectoriales hasta la planificación territorial, que prioricen a los pequeños productores quienes deben ser orientados de acuerdo a la aptitud de sus recursos suelo.

## 1.1 PLANTEAMIENTO DEL PROBLEMA

- PROBLEMA GENERAL

¿En qué medida el impacto de uso de suelo caracteriza la dinámica del Índice de Vegetación de Diferencia Normalizada en el distrito de Tambillo en el periodo 2000-2014?

- PROBLEMAS ESPECÍFICOS

¿Cómo fue el comportamiento de la vegetación en el distrito de Tambillo en el periodo 2000-2014?

¿En qué medida el Índice de Vegetación de Diferencia Normalizada se relaciona con la temperatura y precipitación atmosférica del distrito de Tambillo en el periodo 2000-2014?

## 1.2 OBJETIVOS

- OBJETIVO GENERAL

Evaluar el impacto de uso de suelo según el Índice de Vegetación de Diferencia Normalizada mediante imágenes satelitales en el distrito de Tambillo-Ayacucho, en el periodo 2000-2014.

- OBJETIVOS ESPECÍFICOS

Describir el comportamiento del índice de Vegetación de Diferencia Normalizada según estaciones del año mediante imágenes satelitales del sensor MODIS Terra en el periodo 2000-2014.

Estimar y validar los resultados obtenidos del Índice de Vegetación de Diferencia Normalizada y datos de precipitación y temperatura atmosférica de la estación meteorológica de Tambillo-Ayacucho, en el periodo 2000-2014.

## 1.3 HIPÓTESIS

- HIPÓTESIS GENERAL

La evaluación de impacto de uso de suelo según el Índice de Vegetación de Diferencia Normalizada mediante imágenes satelitales, presentará un decaimiento en la dinámica de la vegetación en el distrito de Tambillo-Ayacucho en el periodo 2000-2014.

- HIPÓTESIS ESPECÍFICAS

El impacto de uso de suelo según el Índice de Vegetación de Diferencia Normalizada servirá para conocer la evolución temporal de la vegetación en el distrito de Tambillo-Ayacucho, en el periodo 2000-2014.

El comportamiento de la vegetación según el Índice de Vegetación de Diferencia Normalizada servirá para estimar y validar los resultados obtenidos de las imágenes MODIS Terra y la estación meteorológica del distrito de Tambillo-Ayacucho, en el periodo 2000-2014.

Los resultados obtenidos tendrán un beneficio para el Gobierno Regional de Ayacucho, municipalidad provincial de Huamanga, municipalidad distrital de Tambillo y otras de la región, además para estudiantes y docentes de la Universidad Nacional de San Cristóbal de Huamanga de las diferentes escuelas de formación profesional de ingeniería y la escuela de Posgrado.

## **CAPÍTULO II**

### **MARCO TEÓRICO**

#### **2.1 ANTECEDENTES**

Al no existir trabajos de investigación sobre evaluación de la vegetación mediante teledetección ambiental en el distrito de Tambillo, las diferentes instituciones vienen implementando acciones de capacitación de acuerdo a sus competencias relacionados al ordenamiento territorial.

La utilización de la teledetección en trabajos relacionados a determinar, estimar y validar la evolución temporal del Índice de Vegetación Normalizado (NDVI) es amplia, siendo en los últimos años numerosos los estudios realizados a nivel internacional, nacional y regional.

A nivel internacional existen antecedentes de trabajos realizados por:

Bart y Sánchez, compararon cinco índices de vegetación (NDVI, SAVI, ARVI, Green NDVI y EVI) determinando sus comportamientos según cubiertas vegetales, en dos periodos del año (verano e invierno) de los años 2001, 2003 y 2005. Obtuvieron que las tendencias generales de las mediciones del vigor de la vegetación son semejantes, aunque existen deferencias localizadas que hace evidente la necesidad de elegir correctamente el tipo del Índice de Vegetación (IV), adecuándose al tipo de estudio. [1]

Fuming Wang et al., estudiaron el desarrollo de un nuevo índice de vegetación basado en el análisis de las limitaciones del Índice de Vigor Relativo (RVI) y PVI en la estimación del LAI y compararon el rendimiento de este nuevo índice en la estimación de LAI. Concluyeron con la creación de un nuevo índice de vegetación (RMPVI), el cual se demostró que, es menos afectado por las condiciones atmosféricas, además de una relación lineal con el LAI, pudiendo ser utilizado para su estimación. [2]

Sancha Navarro, en estudios a partir de índices de vegetación comprobó establecer e identificar diferentes periodos climáticos de sequía y húmedos, cálidos y templados. Concluyendo que los índices de vegetación son instrumentos valiosos tanto en temas de ecología y cuestiones climáticas, siendo una base importante de estudios. [3]

Rabaglio Marcelo, en su tesis Impacto del uso del suelo sobre el Índice de Vegetación Normalizado (NDVI) en el noroeste argentino evaluó los impactos del cambio del uso del suelo en la región de Chaqueña región noroccidental de Argentina abordando cuestiones como la relación entre factores ambientales y edáficos y la dinámica del Índice de Vegetación Normalizado (NDVI) en áreas donde la vegetación ha sido ligeramente modificada y cómo afecta a la dinámica del NDVI la intensificación del uso del suelo. Concluyendo en líneas generales, para el NDVI-I los valores observados son menores que los estimados. [4]

Mattar; Sobrino; Wigner, realizó estudios del uso de los índices de vegetación para poder relacionarlos con la humedad del suelo, concluyeron que NDVI resulta útil para la estimación de la humedad del suelo a través de regresiones semi-empíricas. [5]

Abaurrea Pereda, en su tesis "Comparación de índices de vegetación en zona semiárida de Navarra" (zona donde se encuentra una formación arbórea autóctona Navarra, formada por *Pinus halepensis* y matorral bajo), encontró zonas donde existen campos de cultivos, en ellos, halla una variedad de especies cerealistas cultivadas, cebada, arroz y maíz, concluyendo según el índice de vegetación, presenta variabilidad a la hora de estudiar dicha zona. [6]

Gonzaga Aguilar, en su tesis de Maestría "Aplicación de Índices de Vegetación Derivados de Imágenes Satelitales Landsat 7 ETM+ y ASTER para la caracterización de la cobertura vegetal en la zona centro de la provincia de Loja, Ecuador", que consistió en la evaluación de tres índices de vegetación, como estimadores de cambios de diferentes tipos de cobertura vegetal en la provincia de Loja al sur de Ecuador. Los índices empleados fueron: el Índice de Vegetación de Diferencia Normalizada NDVI, Índice de Estrés Hídrico MSI y el Índice de Vegetación Ajustado al Suelo SAVI, aplicados a imágenes provenientes de dos sensores, Landsat 7 ETM+ y ASTER. Los resultados mostraron que los tres índices de vegetación permitieron discriminar los diferentes tipos de cobertura vegetal analizadas, no hubo diferencias significativas entre los tres. [7]

En el Perú y en la región Ayacucho también existen antecedentes de trabajos realizados por:

Alburqueque et al, estudiaron la estimación de la temperatura superficial del mar peruano usando imágenes AVHRR y MODIS en el infrarrojo térmico. El fin de este trabajo fue estimar la temperatura de la superficie del mar y describir su variabilidad

espacial y temporal usando imágenes AVHRR/3 y MODIS/AQUA donde el área de estudio estuvo ubicado entre las coordenadas 0° - 20° S y 90° - 70 ° O, concluyendo que el coeficiente de correlación entre las imágenes MODIS y AVHRR tiene el valor de 0,985. [8]

Quezada. G y Rojas. A, estudiaron el modelo físico de la estimación de la concentración de clorofila-a en el mar usando imágenes MODIS, concluyendo que la clorofila es un indicador de la biomasa del plancton y se utiliza como una entrada a los modelos de producción primaria o para rastrear corrientes, chorros y plumas oceanográficas. [9]

Moncada, W. Masías, M. Aldana, C. Paiva, D, en la investigación: "Mapeo de nubosidades en la región Ayacucho mediante sistema satelital, 2000 al 2010", encontraron que el cuadrante tres tiene gran ausencia de nubes durante la mayor parte del año con respecto a los otros tres cuadrantes que engloban la región Ayacucho. [10]

Solano .R y Rojas. A., presentaron el proyecto "Evaluación de la vegetación y del estado de suelos de la Región Ayacucho mediante datos satelitales, periodo 2000 – 2012", dirigido por la Universidad Nacional San de Cristóbal de Huamanga, Ayacucho y la Universidad Nacional Mayor de San Marcos, financiado por el Fondo de Desarrollo Socioeconómico del Proyecto Camisea (FOCAM) caracterizando la variabilidad de la vegetación a diferentes pisos ecológicos según el comportamiento de la temperatura del suelo y el NDVI. [11]

Moncada W. Jiménez J. Pereda A. Aldana C. En el trabajo "Cuantificación hidrográfica de la cuenca del Rio Cachi Ayacucho, mediante imágenes satelitales", determinaron modelos de regresión para cada estación anual, según el NDVI promedio con respecto al índice de precipitación promedio, y concluyeron que la presencia máxima de vegetación se da de manera tardía (un mes) con respecto a la precipitación. [12]

## **2.2 FUNDAMENTOS DE LA OBSERVACIÓN REMOTA**

La teledetección se define como la técnica que permite obtener información a distancia de los objetos situados sobre la superficie terrestre. Para que esta observación remota sea posible, es preciso que entre los objetos y el sensor exista algún tipo de interacción.

Nuestros sentidos perciben un objeto sólo cuando pueden descifrar la información que éste les envía. Por ejemplo, somos capaces de ver un árbol porque nuestros ojos reciben y traducen convenientemente una energía luminosa procedente del mismo. Esta

señal, además no es originada por el árbol, sino por un foco energético exterior que le ilumina. De ahí que no seamos capaces de percibir ese árbol en plena oscuridad.

Este sencillo ejemplo nos sirve para introducir los tres principales elementos de cualquier sistema de teledetección sensor (nuestros ojos), objeto observado (árbol) y flujo energético que permite poner a ambos en relación. En el caso del ojo, ese flujo procede del objeto por reflexión de la luz solar. Podría también tratarse de un tipo de energía emitida por el propio objeto, o incluso por el sensor. Estas son, precisamente las tres formas de adquirir información a partir de un sensor remoto: por reflexión, por emisión y por reflexión-emisión.

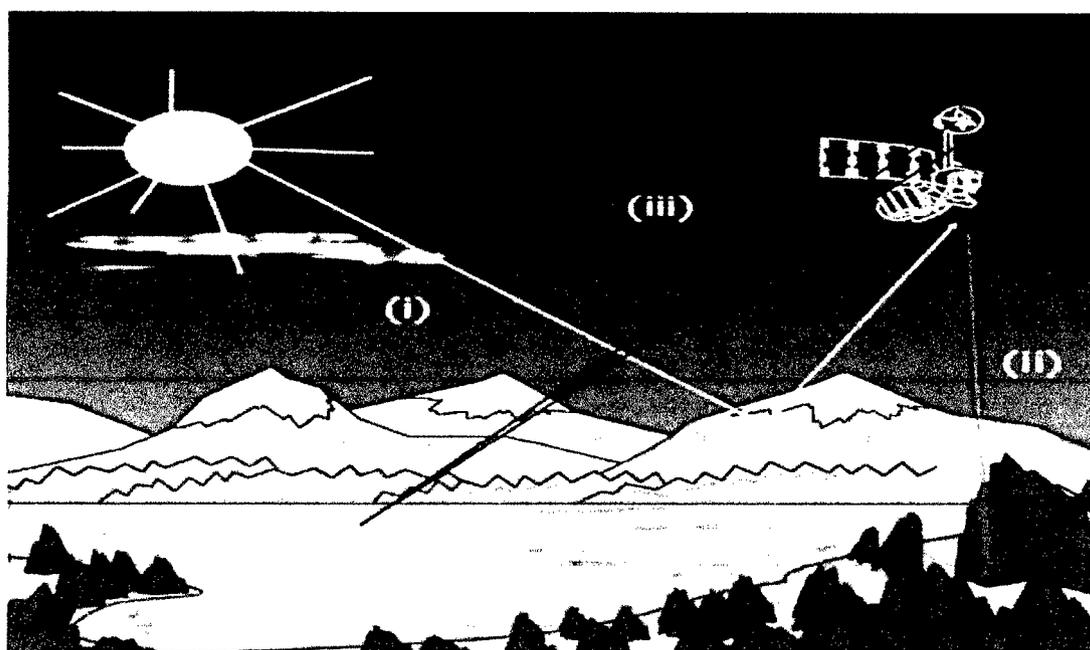


Figura 2.1 Formas de teledetección: (i) reflexión, (ii) emisión, (iii), reflexión-emisión  
Fuente: Chuvieco, E y Huete, A., 2010

La primera de ellas es la forma más importante de teledetección, pues se deriva directamente de la luz solar, principal fuente de energía de nuestro planeta. El sol ilumina la superficie terrestre, que refleja esa energía en función del tipo de cubierta presente sobre ella. Ese flujo reflejado se recoge por el sensor, que lo transmite posteriormente a las estaciones receptoras. Entre superficie y sensor se interpone la atmósfera, que dispersa y absorbe parte de la señal original. De igual forma, la observación remota puede basarse en la energía emitida por las propias cubiertas, o en la que podríamos enviar desde un sensor que fuera capaz, tanto de generar su propio flujo energético, como de recoger posteriormente su reflexión sobre la superficie terrestre.

En cualquiera de estos casos, el flujo energético entre la cubierta terrestre y el sensor constituye una forma de radiación electromagnética. Como es sabido, la energía térmica se transfiere de un lugar a otro por tres procesos: convección, conducción y radiación. De ellos, nos centramos en este último, pues constituye la base de los sistemas de teledetección.

Históricamente las propiedades de la radiación electromagnética se han explicado por dos teorías aparentemente contrapuestas: aquellas que la concibe como un haz ondulatorio (Huygens, Maxwell), y aquella otra que la considera como una sucesión de unidades discretas de energía, fotones o cuantos, con masa igual a cero (Planck, Einstein). Actualmente, parece que ambas teorías se pueden compaginar, pues se ha demostrado que la luz puede comportarse de acuerdo a ambos planteamientos.

Según la teoría ondulatoria, la energía electromagnética se transmite de un lugar a otro siguiendo un modelo armónico y continuo, a la velocidad de la luz y conteniendo dos campos de fuerza ortogonales entre sí: eléctrico y magnético. Las características de este flujo energético pueden describirse por dos elementos: longitud de onda ( $\lambda$ ) y frecuencia ( $\nu$ ). La primera hace referencia a la distancia entre dos picos sucesivos de una onda mientras que la frecuencia designa el número de ciclos pasando por un punto fijo en una unidad de tiempo. Ambos elementos están inversamente relacionados, como describe la siguiente fórmula:

$$c = \lambda \nu \quad (2.1)$$

Donde  $c$  indica la velocidad de la luz ( $3 \times 10^8$  m/s),  $\lambda$  expresa la longitud de onda y  $\nu$  la frecuencia (en Hertz, ciclos por segundo). En definitiva, a mayor longitud de onda, menor frecuencia y viceversa, por lo que basta con indicar un solo término para identificar propiamente el tipo de energía mencionado.

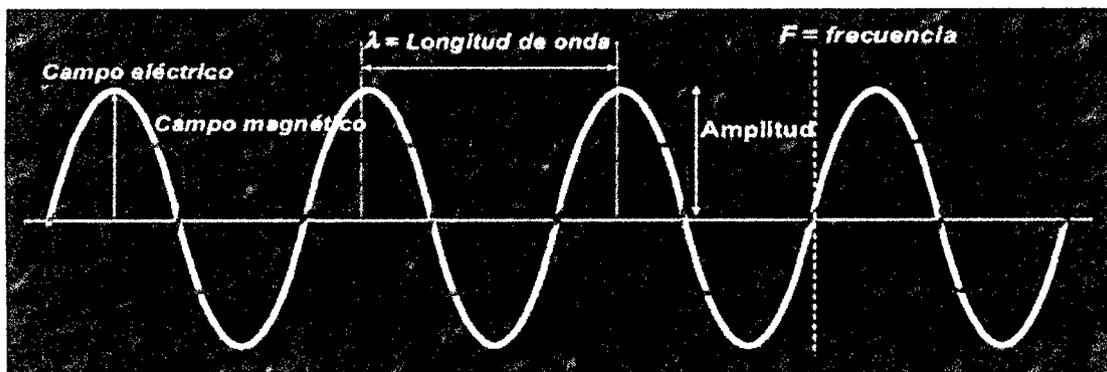


Figura 2.2 Los componentes eléctricos y magnéticos de la radiación electromagnética

Fuente: Chuvieco. E y Huete, A., 2010

Gracias a la teoría cuántica, se puede calcular la cantidad de energía transportada por un fotón, siempre que se conozca su frecuencia:

$$Q = h\nu \quad (2.2)$$

donde  $Q$  es la energía radiante de un fotón (en julios),  $\nu$  la frecuencia y  $h$  la constante de Planck ( $6,6 \times 10^{-34}$  J-s). Sustituyendo en (2.2) podemos así mismo expresar:

$$Q = h\left(\frac{c}{\lambda}\right) \quad (2.3)$$

lo que significa, en definitiva, que a mayor longitud de onda o menor frecuencia, el contenido energético será menor y viceversa. Esto implica que la radiación en longitudes de onda largas es más difícil de detectar que aquella centrada en longitudes cortas, de ahí que las primeras requieran más sofisticados medios de detección. [13]

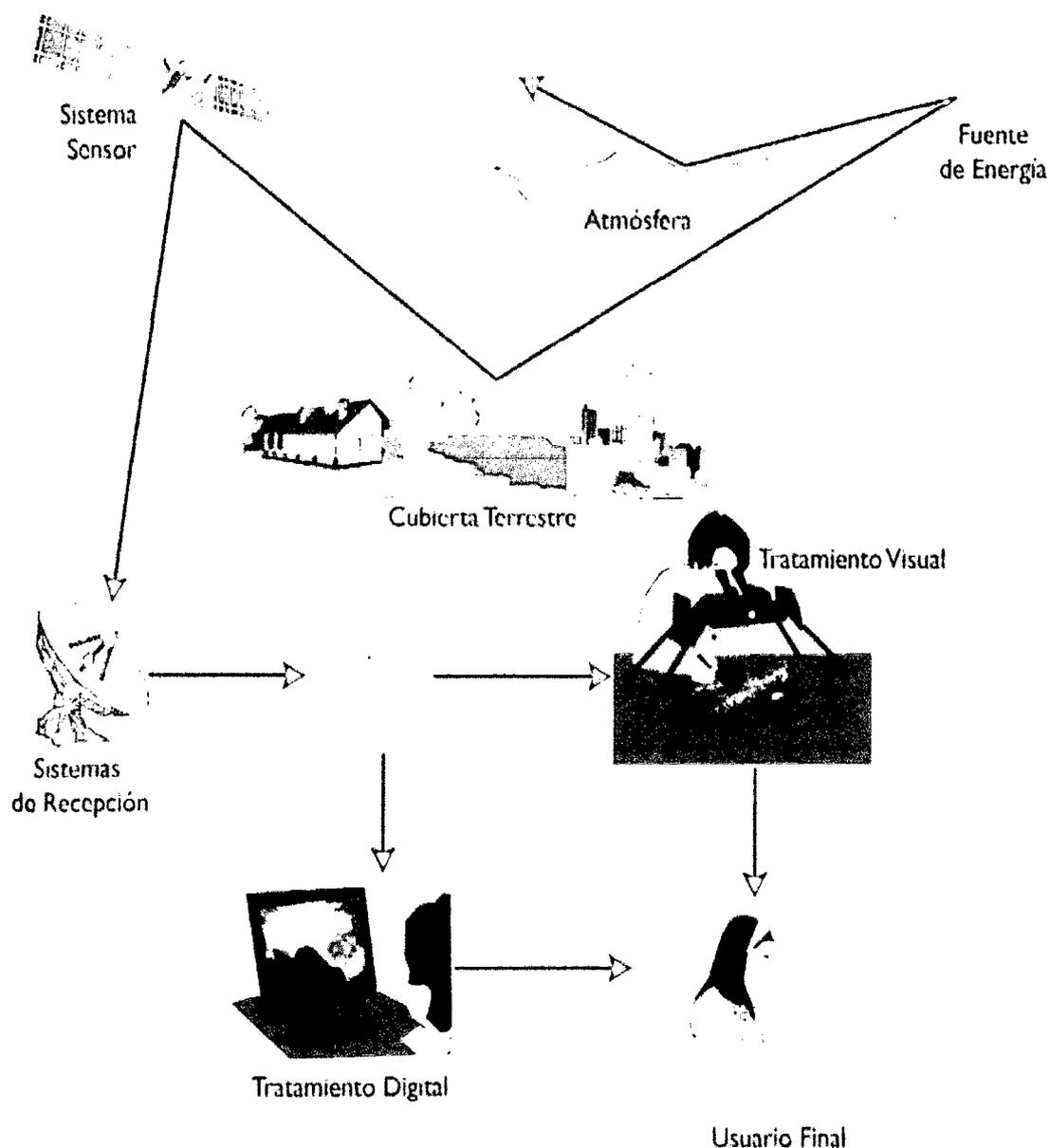
La teledetección es el conjunto de técnicas desarrolladas desde diferentes disciplinas y ciencias para obtener información de áreas extensas y a una distancia de la Tierra. Para obtener esta información se basa en la propagación de ondas electromagnéticas que interactúan con los objetos que se quieren estudiar: la teledetección consiste en medir la energía transportada por esas ondas e interpretar los cambios que han sufrido tras la energía transportada por esas ondas e interpretar los cambios que han sufrido tras su interacción con el objeto, para así conocer el estado de este. [14]

Un sistema de teledetección está compuesto por

- Fuente de energía, que es el origen de la radiación electromagnética, que puede ser una fuente externa (teledetección pasiva) o una fuente interna que emite su propio haz de luz energético (teledetección activa).
- Cubierta terrestre, como masas de vegetación, suelos, agua, infraestructura humana, que reciben radiación energética, reflejándola o emitiéndola de acuerdo a sus características físicas.
- Sensor y plataforma soporte, dicho sensor capta la energía procedente de las cubiertas, la decodifica y la guarda o la envía al sistema de recepción.
- Sistema de recepción y distribución.

- Experto encargado de agregar valor a la información (generación de mapas temáticos).

Como principio fundamental de la teledetección, es necesario conocer el comportamiento de la radiación electromagnética. Este tipo de energía constituye la base de los sistemas de teledetección explicados brevemente a continuación. [id.13]



**Figura 2.3** Elementos del sistema de teledetección espacial

Fuente: <http://lapizarracientifica.bligoo.es/teledeteccion>, consultado 20/04/16

## 2.3 EL ESPECTRO ELECTROMAGNÉTICO

Aunque la sucesión de valores de longitud de onda es continua, se han establecido una cantidad de bandas en donde la radiación electromagnética se comporta de forma similar. A esta serie de bandas se las denomina espectro electromagnético.

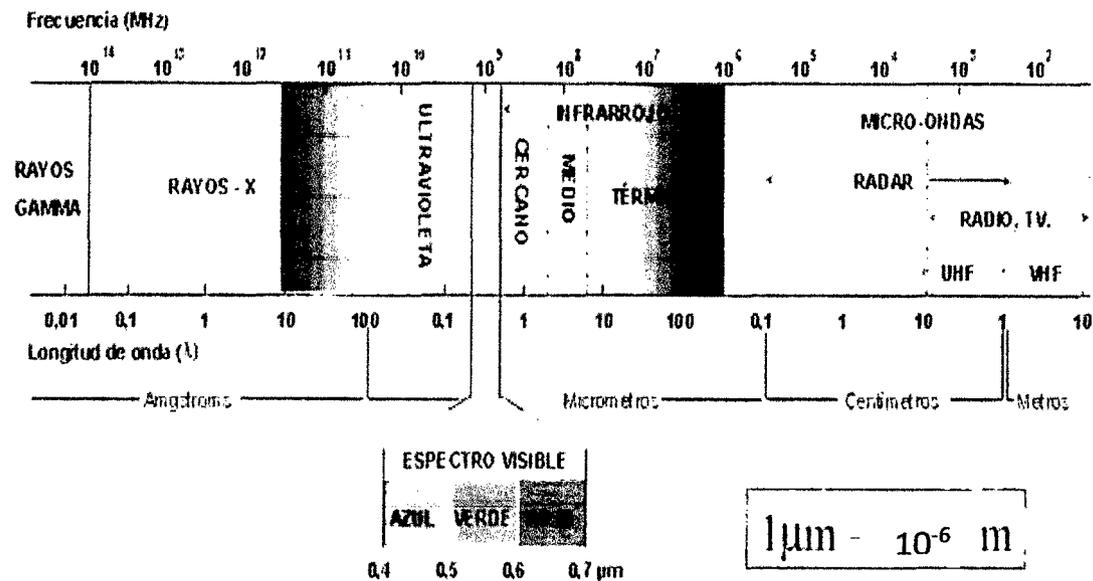


Figura 2.4 El espectro electromagnético con el espectro visible

Fuente: Chuvieco, E y Huete, A., 2010

1. Espectro Visible (0,4  $\mu\text{m}$  a 0,7  $\mu\text{m}$ ): es la única banda electromagnética que puede ser visualizada por el ojo humano. Dentro de esta región se encuentra el azul (0,4  $\mu\text{m}$  a 0,5  $\mu\text{m}$ ); el verde (0,5  $\mu\text{m}$  a 0,6  $\mu\text{m}$ ) y el rojo (0,6  $\mu\text{m}$  a 0,7  $\mu\text{m}$ ).
2. Infrarrojo cercano (0,7  $\mu\text{m}$  a 1,2  $\mu\text{m}$ ). Es importante por su capacidad de discriminación de masas vegetales y concentraciones de humedad.
3. Infrarrojo medio (1,2  $\mu\text{m}$  a 8  $\mu\text{m}$ ). En esta región se entremezclan los procesos de reflexión de luz solar y de emisión de la superficie de la tierra. En dicha banda se sitúan el infrarrojo de onda corta (1,3  $\mu\text{m}$  a 3  $\mu\text{m}$ ), útil para estimar el contenido de humedad en la vegetación y los suelos, y el infrarrojo cercano a 3,7  $\mu\text{m}$  conocida como el infrarrojo medio, imprescindible para la detección de focos de alta temperatura (incendios, volcanes activos, etc.).

4. Infrarrojo lejano o térmico (rango:  $8 \mu m$  y  $14 \mu m$ ). Sirviendo para detectar el calor emitido por la mayor parte de las cubiertas terrestres.
5. Microondas ( $>1 mm$ ). Este tipo de energía es bastante transparente a la cobertura nubosa.

## 2.4 TÉRMINOS Y UNIDADES DE MEDIDA

Como más arriba se indicó, para que pueda producirse una observación remota de la superficie terrestre es preciso que el sensor detecte un flujo energético proveniente de o dirigida a una unidad de superficie y con una dirección concreta. Por tanto, se requiere explicar las unidades de medida comúnmente empleadas en teledetección, con objeto de ser más riguroso al momento de abordar posteriormente los procesos de adquisición. [id.13]

1. **Energía radiante ( $Q$ ):** Indica la energía total radiada en todas las direcciones. Se mide en Joule (J).
2. **Flujo de energía radiante ( $\Phi$ ):** Indica la energía total radiada en todas las direcciones por unidad de tiempo. Se mide en [J/s=vatio, W].

$$\Phi = \frac{dQ}{dt} \quad (2.4)$$

3. **Irradiancia ( $E$ ):** Concepto referido a la energía que llega a un cuerpo a través del espacio procedente de otro (que la ha emitido), análogamente puede hablarse también de irradiancia espectral. Se mide en  $Wm^{-2}$

$$E = \frac{d\Phi}{d\Omega} \quad (2.5)$$

4. **Intensidad radiante ( $I$ ):** Energía total radiada por unidad de tiempo y por ángulo sólido ( $\Omega$ , medido en estereo-radianes: sr) ( $I=Q/t\Omega$ ). Se mide en [W/sr].

$$I = \frac{d\Phi}{d\Omega} \quad (2.6)$$

5. **Radiancia ( $L$ ):** Es el flujo radiante ( $\phi$ ) que abandona una unidad de área en una dirección particular siguiendo un ángulo sólido particular. Las unidades en que se mide son  $Wm^{-2}sr^{-1}$ . Su importancia reside en que es la magnitud que detecta el

sensor, donde  $\theta$  es el ángulo formado por la dirección del flujo radiante y el vector perpendicular a la superficie receptora de tamaño  $A$ .

$$L = \frac{d^2\Phi}{(d\Omega d\sigma \cos\theta)} \quad (2.7)$$

6. **Radiancia espectral ( $L_\lambda$ ):** Cuando la radiancia se refiere a una porción concreta del espectro electromagnético. Se mide en  $[W/m^2 \text{ sr } \mu\text{m}]$ .

$$L_\lambda = \frac{dL}{d\lambda} \quad (2.8)$$

De igual forma que la radiancia, la emitancia e irradiancia también puede complementarse con el calificativo de espectral (añadiéndose el subíndice  $\lambda$ ), para referir a una determinada longitud de onda.

- **Emisividad ( $\varepsilon$ ):** Relación entre la emitancia de una superficie ( $M$ ), y la que ofrecería un emisor perfecto, denominado cuerpo negro, a la misma temperatura ( $M_n$ ).
- **Reflectividad o albedo ( $\rho$ ):** Es la parte de la irradiancia que refleja la superficie receptora, se mide en tantos por uno y se considera por tanto adimensional, es diferente para cada superficie receptora y para cada cuerpo. Relación entre el flujo incidente ( $\phi_i$ ) y el reflejado por una superficie ( $\phi_r$ ).

$$\rho = \frac{\phi_r}{\phi_i} \quad (2.9)$$

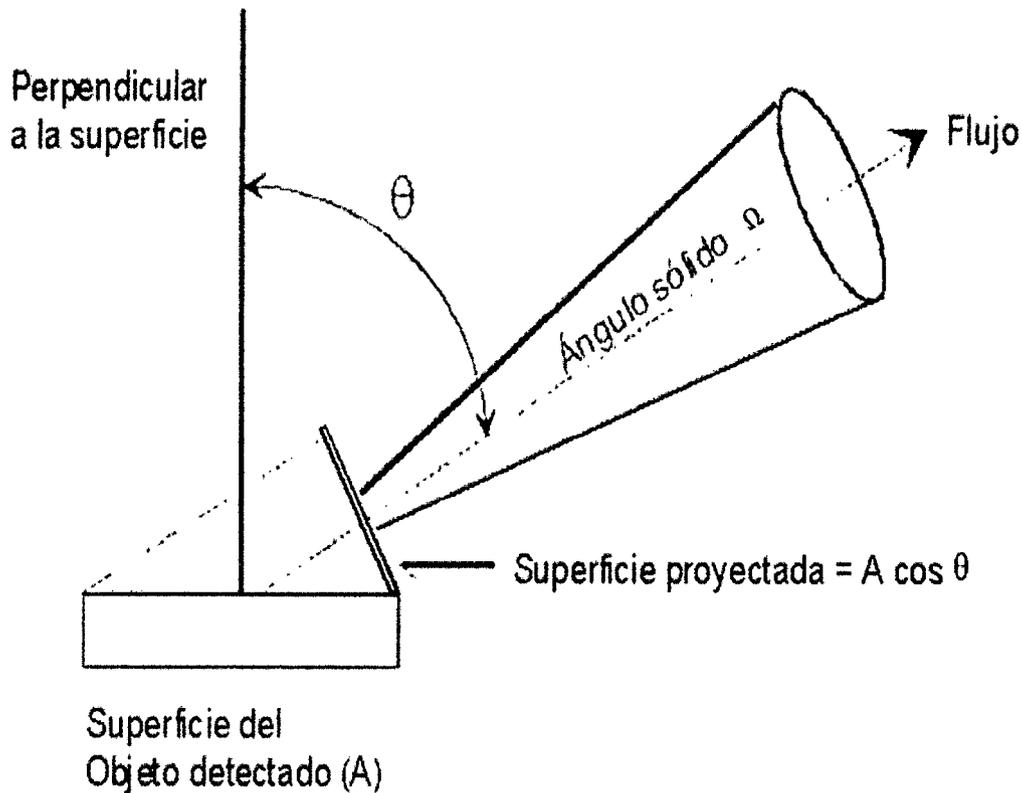
- **Absortividad ( $\alpha$ ):** Relación entre el flujo incidente ( $\phi_i$ ) y el absorbido por la superficie ( $\phi_a$ ).

$$\alpha = \frac{\phi_a}{\phi_i} \quad (2.10)$$

- **Transmisividad ( $\tau$ ):** Relación entre el flujo incidente ( $\phi_i$ ) y el transmitido por una superficie ( $\phi_t$ ).

$$\tau = \frac{\phi_t}{\phi_i} \quad (2.11)$$

Estos últimos términos son adimensionales; suelen expresarse en tanto por ciento o por uno. También estas magnitudes son dependientes de la longitud de onda, por lo que conviene completarlas con el calificativo de espectral, para referirse a su comportamiento en una banda determinada del espectro.



**Figura 2.5** Concepto de la luminosidad y la intensidad radiante.

Fuente: Chuvieco, E y Huete, A., 2010

Es importante tener en cuenta que un sensor de satélite no mide la energía de salida, semiesférica sobre todas las direcciones, pues en su lugar mide solamente la dirección sobre un campo angular de visión estrecho. El resplandor direccional espectral ( $L_\lambda$ ) se relaciona con la existencia espectral hemisférica ( $M_\lambda$ ) de la siguiente manera:

$$M_\lambda = \pi L_\lambda \quad (2.12)$$

Del mismo modo, las reflectancias de la superficie a partir de mediciones por satélite son las reflectancias de dirección en cuanto a que se refieren únicamente a una geometría de medición específica entre los valores de variancia espectral recibidas por un sensor del satélite ( $L_{sen,\lambda}$ ) y la reflectancia espectral de superficie ( $\rho_\lambda$ ) se hace

$$\rho_\lambda = \pi L_\lambda / E_{i,\lambda} \quad (2.13)$$

donde  $E_{i,\lambda}$  es la irradiancia solar que llega a la superficie.

## **2.5 SISTEMAS ESPACIALES DE TELEDETECCIÓN**

Como se indicó, un sistema de teledetección requiere, al menos tres componentes: foco energético, superficie terrestre y sensor. El estudio de las características del sensor y de la plataforma entre las variadas formas de clasificar, la más habitual considera su procedimiento de recibir la energía proveniente de las distintas cubiertas. En este sentido, se habla de dos tipos de sensores (i) pasivos, cuando se limitan a recibir la energía proveniente de un foco exterior a ellos, y (ii) activos, cuando son capaces de emitir su propio haz de energía. Estos últimos son, lógicamente, más flexibles, puesto que no dependen tanto como los primeros de las condiciones exteriores al sistema sensor- Tierra.

Los sensores pasivos consideran su procedimiento para grabar la energía recibida. En cuanto a los sensores activos, el equipo más utilizado es el radar, bastante utilizado en aplicaciones militares.

### **2.5.1 Resolución de un sistema sensor**

La resolución de un sistema sensor se refiere al conjunto del equipo, y no a cada una de sus partes. Dicho de otra forma, la resolución de un sensor depende del efecto combinado de sus distintos componentes. Una mejora en la lente no supondrá necesariamente adquirir fotografías con mayor resolución, si no se acompaña de una película de mayor sensibilidad, o no se modifican las condiciones de exposición. En definitiva, el concepto de resolución implica, al menos cuatro manifestaciones: espectral, espacial, radiométrica y temporal.

### **2.5.2 Características básicas de los sensores remotos**

La resolución de un sistema sensor hace referencia a su "habilidad" para discriminar información. [15]

#### **Resolución angular**

Hace mención a la capacidad de un sensor para observar la misma zona desde distintos ángulos. La resolución angular depende de la longitud de onda en la que trabaja el sistema y la apertura del sistema.

## Resolución espacial

La resolución espacial hace referencia a la identificación del objeto más pequeño sobre la imagen, remarcando el nivel de detalle que ofrece la misma. Se pueden identificar los objetos que superen el tamaño del píxel. Para los sensores ópticos la resolución espacial depende de la distancia al objeto, la apertura y longitud de onda del sistema

$$\Delta x = \frac{\lambda}{L} \cdot D \quad (2.14)$$

donde:

$\lambda$  = longitud de onda

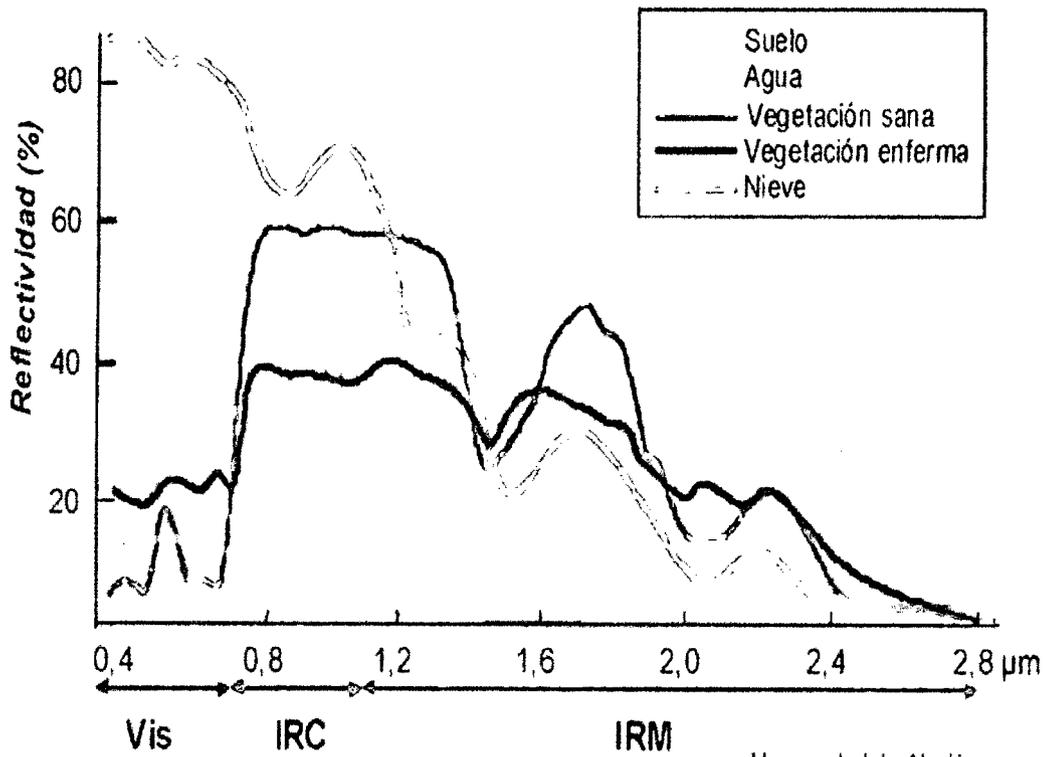
$L$  = apertura focal

$D$  = distancia al objeto

Los sensores de sistemas radar dependen del tamaño de la antena, la altura de la plataforma y el ángulo de incidencia (similar al óptico). Para los sistemas activos coherentes la resolución espacial tiene dos dimensiones: rango y azimut, cada una de las cuales depende del procesamiento de la señal. El primero está definido por la dirección de transmisión y el segundo por la dirección del movimiento del satélite. La combinación de ellos define el área iluminada por el radar. La resolución espacial está ligada con la escala de trabajo y su interpretación.

## Resolución espectral

La resolución espectral indica el número de bandas espectrales que puede discriminar el sensor. La información multiespectral cobra un gran interés ya que detecta en distintas bandas el comportamiento de los objetos presentes en la superficie. Cuantas más bandas espectrales proporcione el sensor, las coberturas podrán ser caracterizadas espectralmente mejor, en la figura 2.6 se observa el comportamiento espectral de la reflectividad (en %) de las coberturas típicas, definida como la relación entre la energía reflejada y el incidente. Si las bandas son estrechas, la señal obtenida será coherente al espectro. Si las bandas son más amplias, se registrará un valor promedio que puede encubrir las diferencias espectrales entre distintas coberturas. Cabe destacar que, entre los sensores remotos, los de radar y los sistemas fotográficos son los de menor resolución espectral. [id.13]



**Figura 2.6** Firmas espectrales típicas de distintas cubiertas

Fuente: Chuvieco, E. y Huete, A. 2010

### Resolución radiométrica

La resolución radiométrica hace mención a la sensibilidad del sensor para detectar variaciones de radiancia espectral. Para los sistemas digitales la imagen se codifica en sistema.

### Resolución temporal

Alude a la frecuencia de cobertura que proporciona el sensor, esto es, periodicidad con la que éste adquiere imágenes de la misma porción de la superficie. En función de las características orbitales de la plataforma (altura, velocidad, inclinación) (MODIS Terra, periodo de revisita cada 16 días 10:30 a.m.).

## 2.6 DOMINIO ÓPTICO DEL ESPECTRO

### Características de la radiación energética en el espectro óptico

Se denomina dominio óptico del espectro a aquel grupo de longitudes de onda directamente dependientes de la energía solar. Tenemos al espectro correspondiente al infrarrojo medio, puesto que mantiene una importante relación con esta fuente de energía, si bien se encuentran a medio camino entre estas y la deriva de la emisión de calor que realizan los objetos. La energía solar presenta una banda de elevada emitancia entre  $0,3 \mu m$  y  $2 \mu m$ , reduciéndose en valores más altos y más bajos de este sector por efecto de la atmosfera. A esta banda se le denomina dominio óptico del espectro, y contribuye la región de mayor interés para la observación remota de la superficie terrestre. La radiación que recibe puede descomponerse en tres términos.

$$\phi_i = \phi_r + \phi_a + \phi_t \quad (2.15)$$

Esto es, el flujo incidente sobre una superficie es reflejado, transmitido o absorbido. Resulta conveniente expresar esta fórmula en unidades relativas. Para ello, basta dividir cada término de la expresión anterior por  $\phi_i$ :

$$\frac{\phi_i}{\phi_i} = \frac{\phi_r}{\phi_i} + \frac{\phi_a}{\phi_i} + \frac{\phi_t}{\phi_i} \quad (2.16)$$

o, lo que es lo mismo:

$$1 = \rho_\lambda + \alpha_\lambda + \tau_\lambda \quad (2.17)$$

En definitiva, la suma de la reflectividad, absortividad y transmitividad ha de ser igual a uno. La proporción del flujo incidente que es reflejado, absorbido y reflejado transmitido depende de las características de la superficie que se observa.

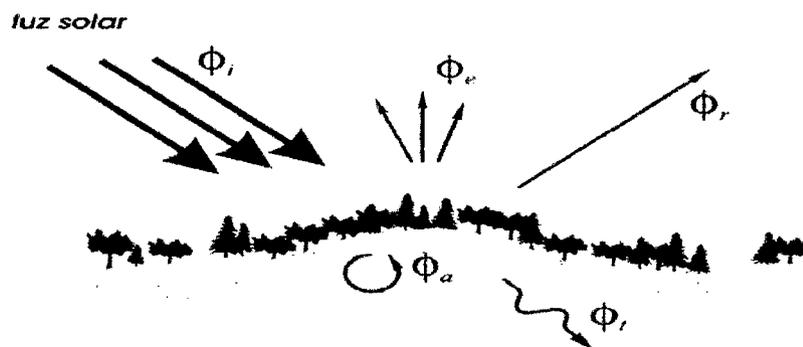


Figura 2.7 Relación entre flujo incidente, reflejado, transmitido y absorbido

Fuente: Chuvieco, E. y Huete, A. 2010

En el caso del espectro visible, ese comportamiento de los objetos a distintas longitudes de onda se manifiesta en lo que llamamos color: un objeto es azul si refleja intensamente la energía en esa banda del espectro y poco en el resto (dicho de otro modo, si absorbe o transmite poca energía incidente en esa banda), mientras será verde si su reflectividad se centra en esa banda y es baja en otras.

La forma geométrica, en la cual un objeto refleja energía es también una consideración importante. Este factor es principalmente una función de la rugosidad de la superficie. Así podemos distinguir entre: [16]

a) **Reflectores especulares.** - Son superficies planas que manifiestan la reflexión como un espejo, tal que el ángulo de reflexión es igual al de incidencia.

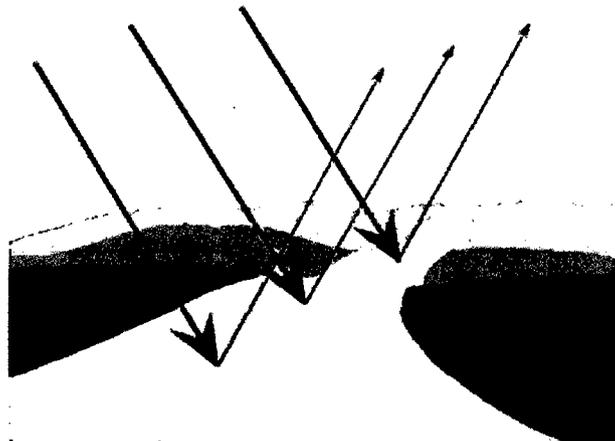


Figura 2.8 Reflexión regular

Fuente: <https://marbelo.webs.ull.es/rs.html>. consultado el 20/04/16

b) **Reflectores difusos o lambertianos.** - Superficies rugosas que reflejan infinitamente en todas las direcciones.

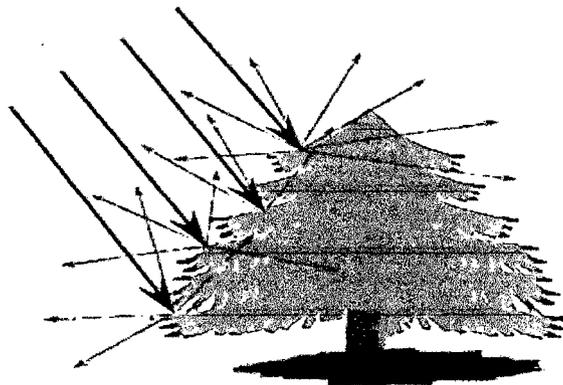


Figura 2.9 Reflexión difusa

Fuente: <https://marbelo.webs.ull.es/rs.html>. consultado el 20/04/16

La mayor parte de las superficies naturales no son reflectores especulares ni difusos, sino una mezcla de ambos. Para clasificar o diferenciar unos reflectores de otros es necesario comparar la rugosidad de la superficie con la longitud de onda de la energía incidente. Así, en la región visible diremos que las superficies suaves como agua en calma o metales pulidos son reflectores especulares ya que la rugosidad de estas superficies es mucho menor que las longitudes de onda usadas.

En el caso contrario, cuando la rugosidad es mucho mayor que la longitud de onda (mar con viento mayor de 10 m/s) la superficie reflejará como un cuerpo lambertiano.

Las reflexiones difusas contienen información espectral sobre el color de la superficie reflectante, mientras que las reflexiones especulares no. Así, en teledetección estamos más interesados en medir las propiedades de reflectividad difusa de los cuerpos terrestres.

## **2.7 REFLECTIVIDAD ESPECTRAL DE LA VEGETACIÓN, SUELO, AGUA Y NIEVE**

**Vegetación.-** Las curvas de reflectividad espectral para la vegetación casi siempre manifiestan los picos-valles que se muestran en la figura 2.6. Los valles en la región del visible vienen dados por los pigmentos en las hojas de las plantas. La clorofila por ejemplo absorbe energía fuertemente en las bandas centradas en  $0,45 \mu m$  y  $0,67 \mu m$ . Es por ello por lo que nuestros ojos perciben la vegetación sana con color verde, debido a la gran absorción en azul y rojo por las hojas y la alta reflexión en el verde. Cuando la vegetación no está sana disminuye la clorofila y el resultado es una absorción en el rojo y el azul, a menudo incrementando la reflectividad espectral en el rojo por lo que vemos las hojas con tono amarillento (mezcla de verde y rojo). Al llegar al infrarojo próximo la reflectividad de la vegetación sana aumenta drásticamente. La región  $0,7 \mu m - 1,3 \mu m$  refleja entre el 40% – 50% de la energía incidente, el resto de la energía es casi toda transmitida, ya que en esta región la absorción es menor que el 5%. La reflectividad de  $0,7 \mu m$  a  $1,3 \mu m$  se debe a la estructura interna de las hojas. Como estas son distintas nos permite diferenciar los tipos de vegetación, aunque en el visible sean muy similares.

Esta región también sirve para detectar estrés en la vegetación más allá de  $1,3 \mu m$ , la reflectividad de las hojas es aproximadamente inversamente proporcional al contenido del agua total presente en las hojas.

**Suelo.-** Casi sin variación espectral, los principales factores que afectan a la reflectividad espectral de los suelos son: humedad, textura (proporción de arena), rugosidad, presencia de óxidos de hierro y materia orgánica. Por ejemplo, la presencia de humedad hace decrecer la reflectividad espectral, al igual que la rugosidad, materia orgánica y la presencia de óxidos de hierro, estos últimos principalmente en el visible.

**Agua.-** Esta transmite la mayor parte de la energía visible que incide en ella, absorbiendo más cuanto mayor es la longitud de onda de la radiación incidente. La mayor reflectividad del agua clara está en torno al azul, disminuyendo cuando se alcanza el infrarrojo próximo. De ahí la facilidad a estas longitudes de onda de distinguir la línea de la costa.

La variabilidad del agua se detecta mejor en longitudes de onda más cortas (azul y verde) y está relacionada con la profundidad, el contenido de materiales en suspensión (clorofila, nutrientes) y rugosidad de la superficie. Así, la reflectividad espectral aumenta en aguas poco profundas.

**Nieve.-** La elevada reflectividad espectral de la nieve en el visible se reduce drásticamente en el infrarrojo cercano. La reflectividad espectral es inversamente proporcional al tamaño de los cristales de hielo.

## **2.8 EFECTOS ATMOSFÉRICOS SOBRE LA RADIACIÓN**

Antes de que la radiación usada en teledetección alcance la superficie de la Tierra, tiene que viajar a través de la atmósfera terrestre a lo largo de una determinada trayectoria y volver a atravesarla en sentido ascendente para que pueda ser detectada por los sensores espaciales. Este es el caso en el que se usan dispositivos que miden en las longitudes de onda del visible, infrarrojo próximo o medio.

En el caso de que se dispongan de sensores térmicos la radiación normalmente sólo puede realizar un viaje ascendente a través de la atmósfera, siguiendo una trayectoria más corta que en el caso anterior.

El efecto neto que produce la atmósfera en ambas radiaciones varía de acuerdo con las siguientes condiciones:

- Longitud de la trayectoria.

- Magnitud de la señal de energía detectada.
- Condiciones atmosféricas presentes.
- Longitudes de onda involucradas.

Los mecanismos atmosféricos que provocan ese efecto tan profundo en la radiación usada en teledetección con la dispersión (scattering) y la absorción.

### **Dispersión**

Cuando la radiación electromagnética incide sobre una partícula o molécula de gas presente en la atmósfera, ésta puede extraer una porción de energía de esta onda incidente, mientras que el resto permanece inalterada. La porción de energía tomada puede ser reemitida en cualquier dirección. A este fenómeno se le conoce como dispersión, difusión o scattering.

Normalmente en estos problemas se define el parámetro de tamaño  $X$  como:

$$X = 2\pi r / \lambda \quad (2.18)$$

Donde  $r$  es el radio de la partícula.

En función de este parámetro de tamaño aparecen varios tipos de scattering:

- **Scattering Rayleigh:** en este caso el tamaño de las partículas es mucho menor que la longitud de onda incidente. Estas partículas son, generalmente moléculas de oxígeno o nitrógeno que se encuentran en la atmósfera. El efecto de la dispersión de Rayleigh es inversamente proporcional a la cuarta potencia de la longitud de onda:

$$I_R \propto \frac{I_0}{\lambda^4} \quad (2.19)$$

donde  $I_0$  , es la radiación incidente e  $I_R$ , la debida a Rayleigh.

Luego las longitudes de onda cortas son mucho más dispersadas que las largas. Este tipo de scattering es el dominante en las partes altas de la atmósfera. El hecho de que el cielo aparezca azul durante el día se debe precisamente a este fenómeno. La luz solar interactúa con las moléculas de la atmósfera dispersándose de forma más efectiva en longitudes de onda corta (azul) que el resto de las longitudes de onda del visible. Sin embargo, al atardecer o al amanecer, la luz solar atraviesa un camino atmosférico mucho más largo, y aunque también tiene lugar este tipo de dispersión, se produce una

mayor absorción de dichas longitudes de onda corta, por lo que finalmente los que prevalecen a esas horas son los colores rojos y naranjas.

Este tipo de scattering es uno de las causas más importantes de la falta de contraste en las imágenes.

- **Scattering Mie:** Cuando las partículas son del mismo tamaño o algo más grandes ( $X < 50$ ) que las longitudes de onda incidentes, tiene lugar este tipo de scattering. Aquí la resolución de las ecuaciones de Maxwell para el cálculo de la radiación dispersada se complica enormemente. Como ejemplo de partículas que producen este tipo de dispersión tenemos: partículas de polvo del desierto, polen, humo, etc. Normalmente el fenómeno de dispersión Mie se produce en las capas bajas de la atmósfera ya que, dada la naturaleza de las partículas que lo producen, éstas difícilmente se encuentran por encima de los seis kilómetros en cantidades apreciables.

### **Absorción**

Mientras que la dispersión de radiación solar es un fenómeno no selectivo, es decir, ocurre casi de forma continua para cualquier longitud de onda, la absorción sí lo es. Además, a diferencia del fenómeno de dispersión, este provoca una pérdida de energía en la radiación. Los principales absorbentes de radiación solar y radiación infrarroja son: el vapor de agua, el dióxido de carbono el metano y el ozono.

El **vapor de agua** absorbe la radiación de onda larga infrarrojo térmico y onda corta en el microondas (desde  $22 \mu m$  a  $1 mm$ ). La presencia de vapor de agua en la parte baja de la atmósfera varía enormemente de punto a punto y en cortos espacios de tiempo. Dos ejemplos contrapuestos de la presencia de este componente son los desiertos, con muy poca cantidad de vapor de agua y las regiones tropicales con una concentración muy alta de humedad.

El **dióxido de carbono** se conoce como el gas más importante del efecto invernadero. Esto es porque tiende a absorber radiación fuertemente en la porción del infrarrojo lejano del espectro electromagnético (zona asociada con el calentamiento térmico), de forma que atrapa calor dentro de la atmósfera.

El **ozono** absorbe radiación ultravioleta del Sol, principalmente en la región más energética, el UVB. Sin él en la atmósfera, nuestra piel se quemaría al exponerla a la luz solar.

Como consecuencia de que estos gases absorben en diferentes regiones del espectro electromagnético, influirán significativamente en las zonas del espectro que se utilizan en teledetección.

Aquellas áreas del espectro electromagnético que no están severamente influenciadas por procesos de absorción son las apropiadas para los sensores remotos y se denominan: **ventanas atmosféricas**.

Si comparamos las dos fuentes de energía más comunes Sol – Tierra, con las ventanas atmosféricas disponibles podremos definir las longitudes de onda que podemos usar más efectivamente en teledetección.

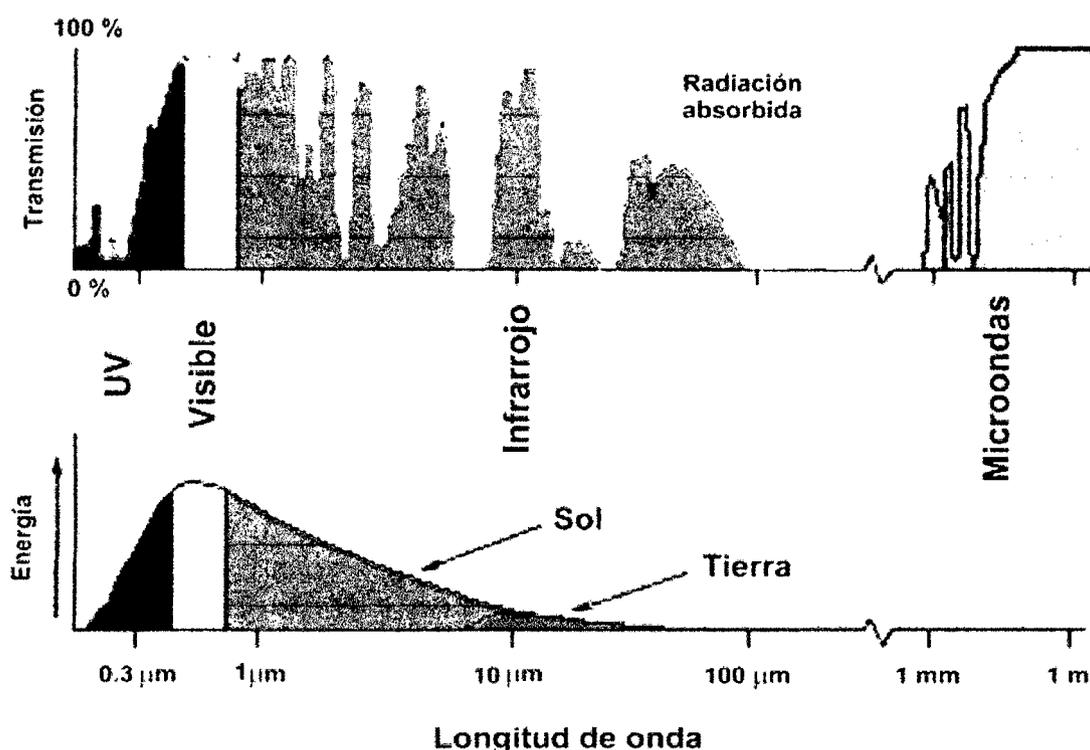


Fig. 2.10 Ventanas atmosféricas.

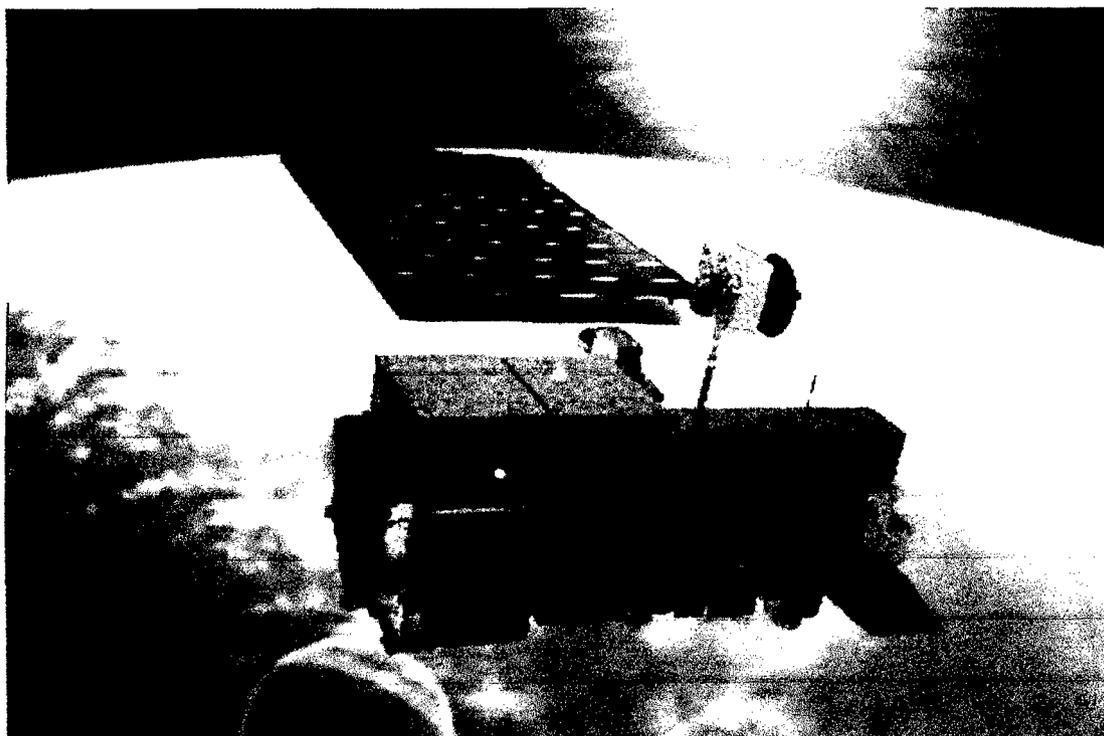
Fuente: <http://www.um.es/LEQ/Atmosferas/Ch-IV-1/F41s10p1.htm>, consultado 20/04/16

La región visible (sensible a los ojos) le corresponde con una ventana atmosférica al nivel del pico de energía del Sol. La energía en forma de calor emitida por la Tierra le corresponde una ventana entorno a 10  $\mu\text{m}$  (8  $\mu\text{m}$  a 14  $\mu\text{m}$ ) en el infrarrojo térmico. Más allá de 1 mm (microondas) hay una ventana atmosférica (1 mm a 1 m). [id.16]

## 2.9 PLATAFORMAS DE TELEDETECCIÓN ESPACIAL

Las plataformas Terra y Aqua cuentan con varios sensores, lo que representa grandes ventajas al obtener diferentes tipos de información con las mismas condiciones atmosféricas, de ángulo de iluminación y de observación y permitiendo la intercalibración entre sensores.

El sensor MODIS presenta diversas innovaciones en relación a sus precursores debido a que fue diseñado por científicos del área de ciencias de la Tierra. Existe una mejoría sustancial en la calidad de los detectores en el sistema de escaneo, un aumento del número de bandas espectrales y el enorme avance en el procesamiento de los datos con algoritmos específicos para la generación de productos de alta calidad con correcciones atmosférica, radiométrica y geométrica. Fue diseñado para operar durante un largo periodo con la misma configuración básica y operación en dos horarios. La aplicación de los datos MODIS varía desde la detección y monitoreo de incendios, estado actual y cambios de la cobertura terrestre, albedo, monitoreo del clima, hasta prevención de desastres naturales y epidemiología. [Todos los productos y datos son distribuidos gratuitamente a través de internet así como los programas para su procesamiento]. [17]



**Figura 2.11** Plataforma del satélite artificial Terra

Fuente: <http://Aqua.nasa.gov>. consultado el 24/04/16

### **2.9.1 Aplicaciones del sensor MODIS para el monitoreo del territorio**

Las actividades humanas han cambiado drásticamente y rápidamente la cobertura de nuestro planeta, por esta razón diversos grupos especializados, gobiernos e instancias internacionales, se han unido para abordar esta problemática. A finales de la década de 1980 comenzaron a llevarse a cabo proyectos creados para el monitoreo de la cobertura terrestre, principalmente a través del sensor AVHRR, cuyos resultados fueron suficientemente alentadores para la creación de otros sensores dirigidos al monitoreo de las coberturas terrestres. Dentro de estos sobresale el sensor llamado espectroradiómetro para imágenes de resolución moderada, o MODIS, por sus siglas en inglés, que fue creado por un equipo científico interdisciplinario. Este sensor está a bordo de dos plataformas, Terra y Aqua. Sus datos cuentan con una alta sensibilidad radiométrica, buena calidad geométrica, alta resolución temporal, y son distribuidos de manera gratuita a través de diferentes portales de internet.

En 1988 la NASA consultó a distintas agencias espaciales y a la comunidad científica para seleccionar de manera formal cada uno de los sensores a bordo de las diferentes plataformas y se seleccionaron 30 instrumentos con sus respectivos "equipos de ciencia", así como veinte proyectos de investigación Interdisciplinaria.

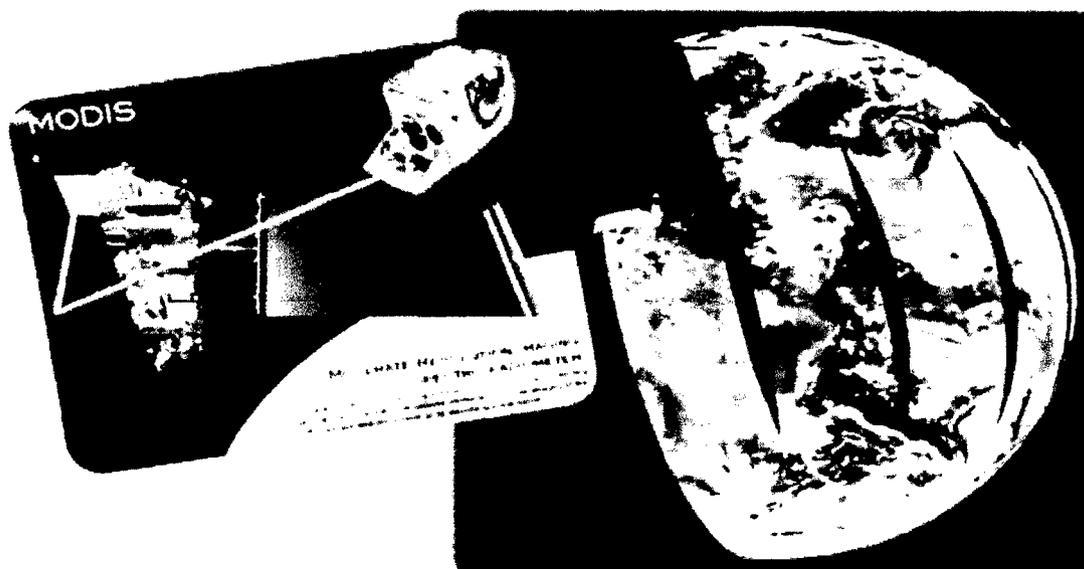
La política para el manejo de datos del EOSDIS (Earth Observing System Data and Information System) se basa en dos principios: la no discriminación y la no exclusividad. La no discriminación está basada en la igualdad de trato para todos los usuarios en términos de acceso y uso de los datos al más bajo costo posible para la investigación científica.

Dentro del proyecto EOS sobresale el sensor llamado espectroradiómetro para imágenes de resolución moderada (*Moderate Resolution Imaging Spectroradiometer - MODIS*) a bordo de dos plataformas, que por sus características espaciales y espectrales es uno de los más importantes para el monitoreo de los procesos de cambio en la Tierra.

### **2.9.2 Especificaciones del sensor MODIS**

El sensor MODIS se encuentra a bordo de los satélites Terra o EOS-AM (lanzado en diciembre de 1999) y Aqua o EOS-PM (lanzado en mayo de 2002). La órbita de ambas plataformas es helio-sincrónica y cuasi-polar con una inclinación de 98.2° y 98° y una

altitud media de 708 y 705 km respectivamente. Terra está programada para pasar de norte a sur cruzando el ecuador a las 10:30 de la mañana en su órbita descendente, mientras que Aqua pasa de sur a norte sobre el ecuador a las 1:30 de la tarde, un esquema del cubrimiento MODIS se presenta en la figura 2.12. Las primeras imágenes captadas por Terra se obtuvieron en febrero del año 2000. Ambas plataformas monitorean la totalidad de la superficie terrestre cada 1 o 2 días dependiendo de la latitud.



**Figura 2.12** Sistema de escaneo del sensor MODIS

Fuente: [http://sos.noaa.gov/images/atmosphere/aqua\\_swath.jpg](http://sos.noaa.gov/images/atmosphere/aqua_swath.jpg), consultado 24/04/16

El instrumento MODIS cuenta con una alta sensibilidad radiométrica (12 bit) en 36 bandas espectrales, en un rango de longitud de onda que va de los  $0,4 \mu m$  a los  $14,4 \mu m$ . Las primeras 19 bandas están posicionadas en la región del espectro electromagnético situado entre  $0,405 nm$  y  $2,155 nm$ . Las bandas de 1 a 7 son útiles para las aplicaciones terrestres; las bandas 8 a 16 para las observaciones oceánicas y las bandas 17 a 19 para las mediciones atmosféricas.

Las bandas 20 a 36, cubren la porción del infrarrojo térmico del espectro de ( $3,660-14,385 nm$ ). Dos bandas son tomadas a una resolución nominal de 250 m al nadir, cinco bandas a 500 m y las 29 bandas restantes a 1 km. MODIS posee una alta calidad geométrica que permite el monitoreo preciso de las alteraciones de la superficie terrestre (error RMS inferior a 50 m).

El sensor MODIS es un explorador de barrido: un espejo móvil que oscila perpendicularmente a la dirección de la trayectoria con un ángulo de  $\pm 55^\circ$  permite explorar una franja de terreno (swath) a ambos lados de la traza del satélite, cuyo ancho es de 2,330 km. [id.17]

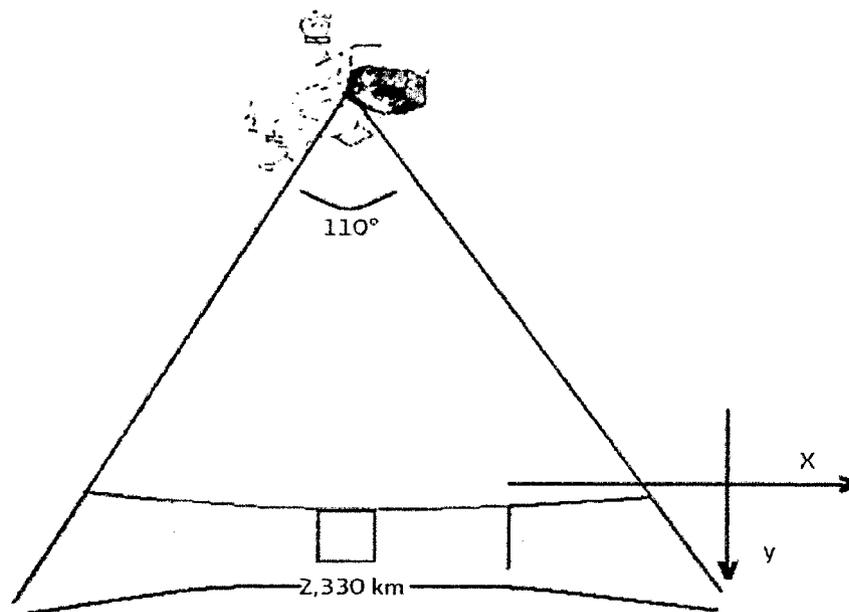


Figura 2.13 Ángulo de visión del sensor MODIS

Fuente: FRANCOIS, J; TZITZIKI, J. LOPEZ, G; COLDITZ., 2011

Algunos datos técnicos y aplicaciones se muestran en la Tabla 2.1 así como una descripción técnica muy detallada de los materiales se encuentra disponible en el portal de la NASA <http://modis.gsfc.nasa.gov/about/scanmirror.php>.

Tabla 2.1 Muestra las especificaciones técnicas principales del sensor MODIS

<b>Sensor MODIS</b>	Dimensión de la franja escaneada	2330 km por 10 km en el nadir
	Velocidad de barrido o tasa de escaneo	20,3 rpm pista transversal, ortogonal a la órbita
	Cuantificación o codificación o sensibilidad radiométrica	12 bits
	Tamaño de la escena	1200 filas por 1200 columnas
	Resolución espacial	250 m (bandas 1-2); 500 m (bandas 3-7) y 1000 m (bandas 8-36)
	Resolución temporal	1 a 3 días

- **Modland: los productos de superficie terrestre MODIS**

Debido a la gran cantidad de productos MODIS, a menudo en diferentes versiones y resoluciones espaciales y temporales, el usuario principiante puede sentirse un poco confundido. Con base en los datos MODIS, se elabora una gran variedad de productos enfocados al estudio de los océanos (MOcean), la atmósfera (MODIS Atmosphere), la criósfera y las cubiertas terrestres (MODLAND).

Estos productos pueden dividirse en tres grandes grupos

- Variables relacionadas con el balance de energía: estas incluyen la reflectancia de la superficie (MOD09), la cobertura de nieve (MOD10), la temperatura y la emisividad de la superficie terrestre (MOD11), el albedo y la función de la distribución de la reflectancia bi-direccional (MOD43).
- Variables biofísicas relacionadas con la vegetación que comprenden los índices de vegetación (MOD13), el índice de área foliar o LAI por sus siglas en inglés y la fracción de radiación activa fotosintética FPAR (MOD15) y la producción primaria (MOD17).
- Características de la cobertura terrestre: coberturas del suelo (MOD12), puntos de calor e incendios (MOD14), conversión de la cobertura vegetal y fracción de vegetación (MOD44) y finalmente áreas quemadas (MCD45). [18]

### **2.9.3 Variables biofísicas relacionadas con la vegetación**

#### **Índices de vegetación MOD13**

El producto MOD13 presenta dos índices de vegetación (IV): El índice de vegetación de diferencia normalizada (NDVI) y el índice de vegetación mejorado (EVI). El NDVI se produce mediante el cálculo del cociente normalizado de la banda del infrarrojo cercano y la banda del rojo.

#### **Análisis de series de tiempo**

La alta resolución temporal del sensor MODIS permite la generación de series de tiempo debido a que es posible observar cualquier parte de la Tierra diariamente. En los resultados se explica algunas herramientas seleccionadas útiles para generar series de tiempo con los datos del sensor MODIS. [19]

## 2.10 ÍNDICE DE VEGETACIÓN

La cobertura vegetal fue uno de los primeros focos de la investigación de la evaluación y manejo de recursos naturales, usando imágenes de satélites. Para lograr ello, la información satelital entregada a través de una imagen multibanda, debe ser categorizada y agrupada, para permitir discriminar un área con características particulares de otra. Una forma de expresar esta categorización o agrupamiento es mediante la elaboración de índices. [20]

Un Índice de Vegetación, puede ser definido como un parámetro calculado a partir de los valores de la reflectancia a distintas longitudes de onda, y que es particularmente sensible a la cubierta vegetal. También, corresponde a un número generado por alguna combinación de bandas espectrales y que puede tener alguna relación con la cantidad de la vegetación presente en un píxel dado. Estos índices, son utilizados para mejorar la discriminación entre el suelo y la vegetación, reduciendo el efecto del relieve en la caracterización espectral de las diferentes cubiertas.

Los valores resultantes de estos índices son adimensionales, e indican el vigor de la clorofila, donde los valores bajos indican vegetación poco vigorosa, enferma o simplemente ausencia de vegetación, mientras que los valores altos, indican vegetación muy vigorosa o sana. Sin embargo, en algunos casos (como los índices RVI y NRVI) el valor del índice de vegetación es inversamente proporcional a la cantidad de vegetación presente en el área, por lo que se recomienda poner atención al momento de interpretar alguno de ellos.

Al hablar de índices nos referimos a un conjunto de operaciones algebraicas efectuadas sobre los valores numéricos de los píxeles, usando dos o más bandas pertenecientes a la misma escena.

En la siguiente tabla, se exponen diversos índices basados en la pendiente.

Tabla 2.2 Índices basados en la pendiente

Nombre del índice	Fórmula	Características	Autor y año
<b>NDVI</b> Diferencia normalizada	$NDVI = \frac{\rho_{IRC} - \rho_R}{\rho_{IRC} + \rho_R}$	Minimiza efectos topográficos y produce escala lineal de medición. La escala va de -1 a 1 con el valor cero representando el valor aproximado donde empieza la ausencia de vegetación. Los valores negativos representan superficies sin vegetación.  La normalización que realiza, reduce el efecto de la degradación de calibración del sensor y la influencia de los efectos atmosféricos. Gran sencillez matemática.	Rouse et al.  1974
<b>TVI</b> Transformado	$TVI = \sqrt{\left(\frac{\rho_{IRC} - \rho_R}{\rho_{IRC} + \rho_R}\right) + 0.5}$	0,5 evita valores negativos. La raíz cuadrada, intenta corregir los valores que se aproximan a una distribución de Poisson e introduce una distribución normal. No elimina todos los valores negativos.	Autor no encontrado
<b>TTVI</b> Transformada de Thiam	$TTVI = (ABS(NDVI + 0.50))^{0.5}$	Corrige la sobreestimación del verde del TVI.	Thiam
<b>RV<sup>P</sup></b> Cociente simple	$RVI = \frac{\rho_{IRC}}{\rho_R}$	Poco sensible a las condiciones de iluminación, pero mucho a las propiedades ópticas de la tierra.	Pearson y Miller  1972
<b>NRV<sup>P</sup></b> Cociente simple normalizado	$NRVI = \frac{RVI - 1}{RVI + 1}$	El resultado del NRVI es normalizado. Es similar al NDVI, reduce los efectos de la topografía, la iluminación y los efectos atmosféricos, además de crear una distribución normal estadísticamente deseable.	Perry y Lautenschlager 1984
<b>NDWI</b> Diferencial de agua normalizado	$NDWI = \frac{\rho_{IRC} - SWIR}{\rho_{IRC} + SWIR}$  $\rho_{IRC}$ = Infrarrojo Cercano  $SWIR$ = Infrarrojo medio	Este índice se utiliza para medir la cantidad de agua que posee la vegetación o el nivel de saturación de humedad que posee el suelo. Los valores que se obtienen oscilan entre -1 y 1, para las zonas con menos humedad	Cievers (1988).

Fuente: Muñoz Aguayo, P. Geógrafo, CIREN, 2015

## Índices basados en la pendiente

Estos índices, usan el cociente de la reflectancia de una banda con otra, (usualmente rojo e IR cercano, debido al alto contraste o diferencia en la reflectancia, que presenta la clorofila en ambas bandas). El término 'basado en la pendiente' se refiere a que, al analizar los valores resultantes del índice de vegetación, se comparan esencialmente las pendientes de las líneas que pasan a través del origen y de los píxeles representados en un gráfico, con la reflectancia de una banda en el eje de las X y la reflectancia de la otra en el eje Y. [id.20]

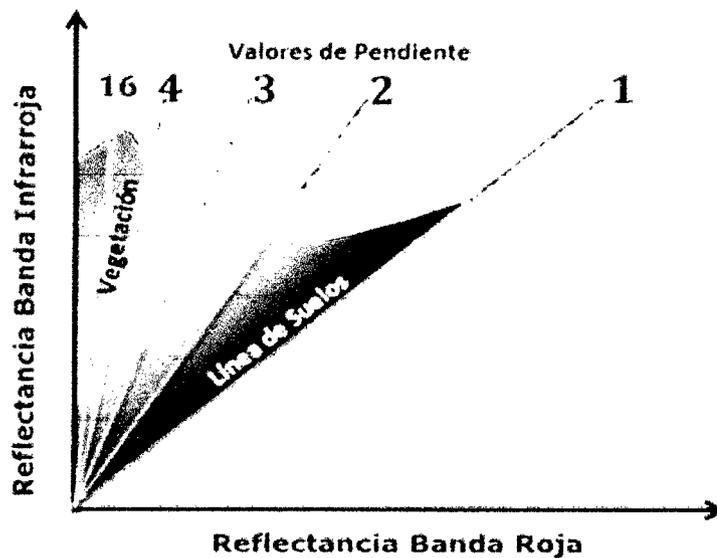


Figura 2.14 Relación de valores de la reflectancia de la banda infrarroja y roja

Fuente: Muñoz Aguayo, 2015

El gráfico, muestra las líneas que convergen en el origen y que representan diversas concentraciones de vegetación o niveles de vigor de la misma. Este diagrama grafica en el eje X los valores de reflectancia de la banda roja y el eje Y los valores de la banda infrarroja. En la medida que los valores se alejan de la línea de suelos, los valores graficados, corresponden cada vez más vegetación.

- Índice de Vegetación de Diferencia Normalizada (NDVI)

El Índice de Vegetación Diferencial Normalizado, es el más conocido de todos, y es el más utilizado para todo tipo de aplicaciones. La razón fundamental su sencillez de cálculo y disponer de un rango de variación fijo (entre  $-1$  y  $+1$ ), lo que permite establecer umbrales y comparar imágenes.

- Valores muy bajos de NDVI, del orden de 0,1 corresponden a áreas rocosas, arenosas o nevadas.
- Valores de 0,2 a 0,3 corresponden a áreas pobres con arbustos pasturas naturales.

A partir de estos valores se tienen los niveles correspondientes a praderas, cultivos, forestaciones y otros dependiendo del valor alcanzado.

El índice de vegetación se define como un parámetro calculado a partir de los valores de la reflectancia a distintas longitudes de onda, y es particularmente sensible a la cubierta vegetal. Estos índices no miden directamente la productividad ni disponibilidad vegetal, pero tienen una estrecha relación con estas variables, lo que permite utilizarlos para análisis regionales. Es decir, que los cambios del índice de vegetación permiten inferir si un determinado mes o año es mejor o peor respecto al valor histórico.

El utilizar estos índices tiene su fundamento en el particular comportamiento radiométrico de la vegetación. Una cubierta vegetal en buen estado de salud, tiene una firma espectral que se caracteriza por el contraste entre la banda del rojo (entre 0,6  $\mu\text{m}$  y 0,7  $\mu\text{m}$ .), la cual es absorbida en gran parte por las hojas, y el infrarrojo cercano (entre 0,7  $\mu\text{m}$  y 1,1  $\mu\text{m}$ .), que es reflectada en su mayoría. Esta cualidad de la vegetación permite la realización de su valoración cualitativa mediante:

$$NDVI = \frac{\rho_{IRC} - \rho_R}{\rho_{IRC} + \rho_R} \quad (2.20)$$

donde:

$\rho_{IRC}$  : reflectividad en el infrarrojo cercano

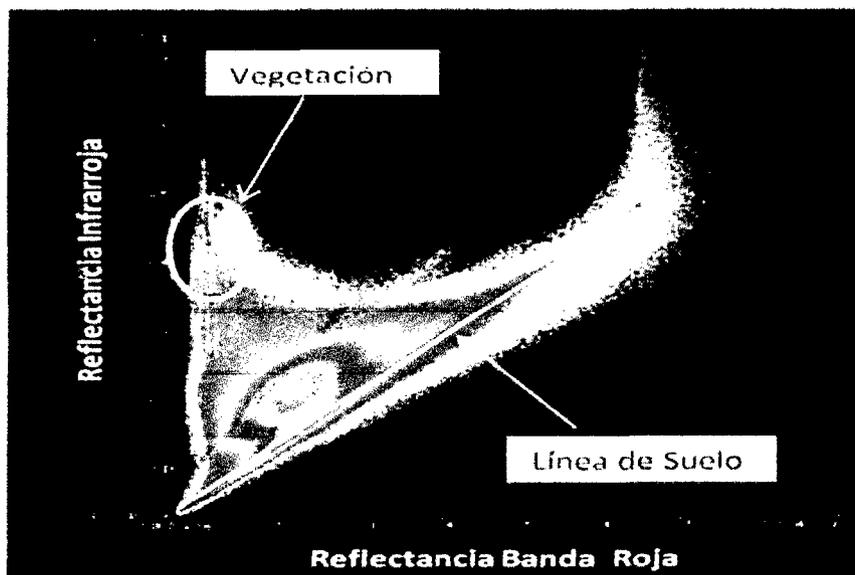
$\rho_R$  : reflectividad en el rojo

El rango de valores de las reflexiones espectrales se encuentra entre 0 y 1; ya que, la reflectividad del infrarrojo cercano como la del rojo, son cocientes de la radiación reflejada sobre la radiación entrante en cada banda espectral. El NDVI varía su valor entre -1 y 1, teniendo gran sencillez de cálculo y de facilitar la interpretación directa de los parámetros biofísicos de la vegetación. Además permite la comparabilidad entre datos obtenidos por diferentes investigadores. Por otro lado tiene el inconveniente de que posee poca capacidad de minimizar la influencia del suelo y de la atmósfera.

El NDVI permite identificar la presencia de vegetación verde en la superficie y caracterizar su distribución espacial así como la evolución de su estado a lo largo del tiempo. Esto está determinado fundamentalmente por las condiciones climáticas.

La interpretación del índice debe asimismo considerar los ciclos fenológicos y de desarrollo anuales para distinguir oscilaciones naturales de la vegetación de los cambios en la distribución temporal y espacial causados por otros factores. El agua tiene reflectancia del rojo mayor que el infrarrojo cercano, por lo tanto valores negativos de NDVI. Las nubes presentan valores similares de rojo e infrarrojo cercano, por lo que su NDVI es cercano a 0. El suelo descubierto y con vegetación rala presenta valores positivos aunque no muy elevados. La vegetación densa, húmeda y bien desarrollada presenta los mayores valores de NDVI.

Sin embargo, tiene el inconveniente de ser sensible a la reflectividad del suelo sobre el que se sitúa la planta, lo que limita su potencial de discriminación. Por ejemplo, en una zona con baja densidad de vegetación, la reflectividad de un pixel en la banda infrarroja y en la banda roja, vendrían determinados fundamentalmente por el suelo, con una pequeña variación debida a la presencia de vegetación. El resultado, es que un índice de vegetación de esa zona, daría resultados muy similares a los del suelo desnudo y sería imposible detectar la presencia de vegetación. De hecho, este problema es bastante grave cuando la cubierta vegetal es menor del 50%, lo que ocurre bastante a menudo, incluso en zonas cultivadas, siendo su uso poco aconsejable en esas condiciones. [id.20]



**Figura 2.15** Regresión lineal entre la banda roja e infrarroja

Fuente: Muñoz Aguayo, 2015

Para resolver este problema y poder estudiar la vegetación, incluso en zonas de baja densidad, se han desarrollado diversos índices de vegetación, que se describen a continuación.

- **Índices basados en la distancia**

Los valores de reflectancia registrados por el sensor, para cada pixel, constituyen una reflectancia promedio de todos los tipos de coberturas que están dentro de ese pixel. Cuando en zonas áridas y semiáridas la vegetación es dispersa, la reflectancia recibida pertenece tanto a vegetación como suelo.

Estos índices, que tratan de separar la información entre la vegetación y el suelo, se basan en el uso de una línea del suelo y las distancias desde ella. Una línea de suelo, es una ecuación lineal que describe la relación entre los valores de reflectancia de la banda roja e infrarrojo cercano para los píxeles que representan suelo. Esta línea se genera ajustando una regresión lineal entre la banda roja e infrarrojo cercano para una muestra de píxeles de suelo desnudo.

Otra forma de hacerlo, es generar un mapa de dispersión entre la banda infrarrojo, eje (Y) y la banda roja, eje (X), como se aprecia en la figura 2.15 y trazar la línea que mejor se ajusta a la base de los puntos graficados, representada en amarillo. Con esto se puede obtener la pendiente y la distancia al origen.

Una vez establecida esta relación, todos los píxeles desconocidos que tienen la misma relación en los valores de reflectancia de las bandas roja e infrarroja son asumidos como suelo desnudo. Los que caen lejos de la línea de suelo, porque tienen mayor respuesta de reflectancia en el infrarrojo cercano, se consideran vegetación. Aquellos que aparecen lejos de la línea de suelo, porque su reflectancia roja es más alta, se asumen como agua (la respuesta espectral del agua es mayor en el rojo que en el infrarrojo).

En la siguiente tabla, se exponen diversos índices basados en la distancia a la línea de suelo.

Tabla 2.3 Índices basados en la distancia

Nombre del índice	Fórmula	Características	Autor/año
<b>PVI</b> Perpendicular	$PVI = \frac{(bNIR - RED + a)}{\sqrt{b^2 + 1}}$ <p><i>NIR</i> = reflectancia en la banda infrarroja cercana  <i>RED</i> = reflectancia en la banda roja visible  <i>a</i> = ordenada al origen de la línea del suelo  <i>b</i> = pendiente de la línea del suelo</p>	Usa la distancia perpendicular de cada pixel a la línea del suelo.	Richardson y Wiegand 1974
<b>DVI</b> De diferencia	$DVI = bNIR - RED$	Un valor de cero indica suelo desnudo, los menores de cero, agua y los mayores de cero, vegetación.	Richardson y Everitt 1992
<b>SAVI</b> De suelo ajustado	$SAVI = \frac{NIR - R}{[NIR + R + L]} (1 + L)$	Incorpora una constante de suelo, la cual se usa de acuerdo con vegetación de baja, intermedia o alta densidad. Considera la influencia de la luz y del suelo oscuro en el índice.	Huete 1988
<b>TSAVI</b> suelo ajustado transformado	$TSAVI = \frac{b(NIR - bRED - a)}{RED + bNIR - ab + X(1 + b^2)}$ <p><i>X</i>=parámetro a determinar para minimizar, la influencia del suelo.</p>	Considera la pendiente y el intercepto de la línea de suelo. Mucho efecto del suelo de fondo. Tiene varias modificaciones de transformaciones.	Baret y Guyol 1991
<b>MSAVI</b> De suelo ajustado, transformado	$MSAVI = SAVI$ <p>con <math>L = 1 - 2 * s * NDVI * WDV</math>  <i>s</i> = Pendiente de la línea de suelo  <math>WDVI = IRC - s * R</math></p>	Índice de gama limitada: $-1 < MSAVI < 1$ . <i>L</i> no es a priori, sino que calculada. Reduce la incerteza del SAVI +-2,5% a +-1,6%. Es similar al WDV en la reducción del ruido del suelo, pero sus valores de índice de vegetación son mayores.	Qi, Kerr, Chehbouni, Huete 1994
<b>MSAVI2</b> 2° de suelo ajustado transformado	$MSAVI2 = \frac{2NIR + 1 - \sqrt{[(2NIR + 1)^2 - 8(NIR - RED)]}}{2}$	Es la segunda modificación del SAVI. Es como una repetición del MSAVI que básicamente utiliza procesos iterativos y sustituye el factor <i>L</i> del MSAVI por 1-MSAVI (n-1). En el proceso, se elimina la necesidad de pre calcular WDV, NDVI y encontrar la línea de suelo.	Qi et al. 1994
<b>WDVI</b> De diferencia Ponderada	$WDVI = NIR - bRED$ <p><i>b</i> = Pendiente de la línea de suelo</p>	Es matemáticamente más simple. Como el PVI, el WDV es muy sensible a las variaciones atmosféricas.	Clevers 1988

Fuente: Muñoz Aguayo, P. Geógrafo, CIREN, 2015

Ante el elevado número de índices de vegetación, es inevitable preguntarse ¿Qué índice de vegetación se debe usar? Según algunos investigadores entre ellos Abaurrea opina lo siguiente: [id.20]

“NDVI. Casi todos los que hacen mucha teledetección en vegetación usan NDVI, y a menudo es mejor atenerse a lo que la gente conoce y confía. NDVI es simple, cuenta con el mejor rango dinámico de cualquiera de los índices y tiene la mejor sensibilidad a los cambios en la cubierta vegetal”.

## **2.11 EVALUACIÓN DE SUELOS**

El concepto “Tierra” abarca más que el concepto “suelo” [id.5]. La evaluación de tierras se designa como un concepto integrado y multidisciplinario considerando los factores agrícolas, sociales, económicos y otros ecosistemas más allá que suelo (como recursos de agua y clima).

La evaluación de suelos tiende a enfocar en los requerimientos específicos del suelo y manejo de tierras y el encuadre entre ambos. La mayoría de las evaluaciones de suelos han sido implementadas para manejos de sistemas agrícolas y sistemas de cultivos.

### **Uso actual de la Tierra**

El estudio del uso actual de la Tierra, permite determinar las diferentes formas de utilización de la Tierra, la cual al ser integrada con la información de otras disciplinas (suelos, geomorfología, hidrología, y otros) proporcionan elementos de juicio necesarios para la formulación de planes y medidas tendientes a impedir o atenuar los probables impactos ambientales.

El mayor porcentaje de la actividad agrícola de la zona en estudio está localizada en cimas y laderas altoandinas, y el pastoreo de caprinos y vacunos se encuentran en los valles interandinos junto con las viviendas dispersas, canales de regadío de chacras, canal madre del proyecto Cachi y caminos rurales hacia los distintos centros de producción.

La cubierta vegetal existente está dominada por áreas de cultivo que muchas veces utiliza agua de regadío complementario para asegurar las cosechas, por matorrales y bosques en pequeñas extensiones, así como por pastos altoandinas.

La información de los estudios de Inventario y Evaluación del Recursos Naturales de Microcuencas Alto andinas del departamento de Ayacucho ejecutados por INRENA en 1999 para PRONAMACHCS y la propuesta por la Unión Geográfica Internacional UGI clasificó el uso de la Tierra en nueve categorías.[21]

- a) Terrenos urbanos y/o instalaciones gubernamentales y privadas: Corresponde a las áreas ocupadas por el hombre (centros poblados y las instalaciones utilizadas para las actividades de desarrollo) como Zona Urbana (ZU).
- b) Terrenos con hortalizas
- c) Terrenos con frutales y otros cultivos perennes
- d) Terrenos con cultivos extensivos: cartografiada dentro de vegetación cultivada
- e) Terrenos con praderas mejoradas permanentes
- f) Terrenos con praderas naturales: vegetación de páramo: pajonal de puna
- g) Terrenos con bosque:
  - o Matorral: matorral muy ralo con gramíneas temporales, matorral ralo espinoso, matorral denso resinoso.
  - o Bosques: bosque seco caducifolio, bosque de eucalipto, bosque ralo perennifolio.
- h) Terrenos pantanosos y/o cenagosos.
- i) Terrenos sin uso y/o improductivos.

## CAPÍTULO III

### MATERIALES Y MÉTODOS

#### 3.1 DESCRIPCIÓN DEL ÁREA GEOGRÁFICA EN ESTUDIO

El área geográfica donde se desarrolló la presente investigación fue el distrito de Tambillo provincia de Huamanga región de Ayacucho, ubicado en la parte sur oriental de la sierra central del Perú, con coordenadas geográficas de 13°11'28" Latitud Sur y 74°06'30" Longitud Oeste, siendo la capital el distrito Tambillo que se encuentra a 3080 m.s.n.m., teniendo una extensión territorial de 218,62 km<sup>2</sup>.

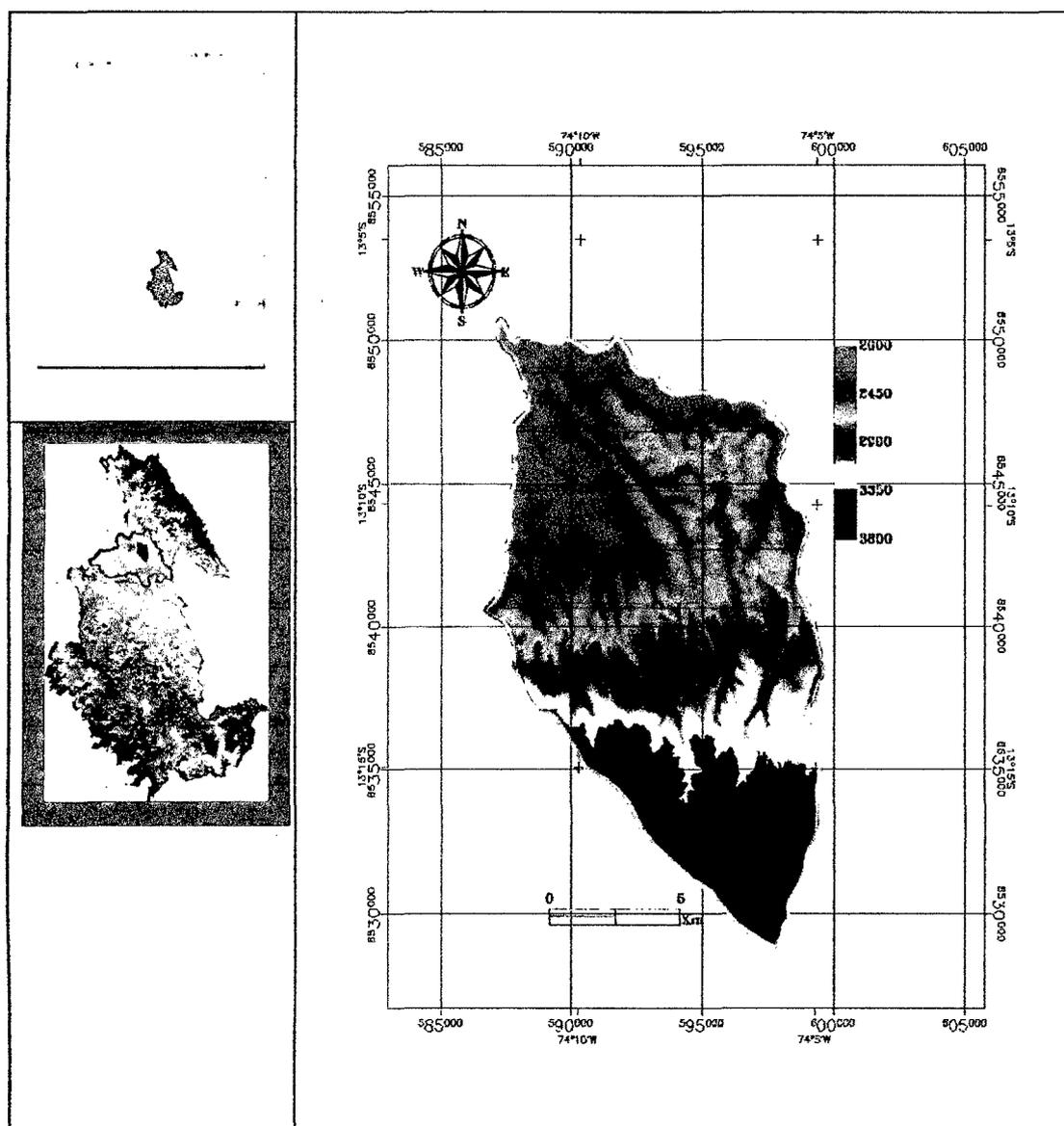


Figura 3.1 Ubicación del área geográfica en estudio, distrito de Tambillo

El territorio del distrito de Tambillo está situado desde altitudes de 2150 m.s.n.m. hasta los 3600 m.s.n.m., comprende una zona geográfica sierra, abarca varios pisos ecológicos o regiones naturales (definición elaborado por el Dr. Javier Pulgar Vidal en las "Ocho Regiones Naturales del Perú") que van desde la yunga, quechua y suni. Está comprendido entre las cuencas del río Huatatas y el río Niño Yucaes en la parte norte, y el río Pallccayacu en la parte este, teniendo como principal afluente del río Pampas, donde buena parte de su población y sus comunidades están situados en la parte baja del distrito, como el valle de Muyurina y el niño Yucaes. [22]

### 3.1.1 Clima

El distrito de Tambillo ubicado en el departamento de Ayacucho posee una diversidad de climas debido a la variación altitudinal que presenta desde el cálido al frígido, siendo las temperaturas diurnas relativamente altas. El distrito presenta una temperatura media atmosférica de 17°C y con una oscilación o amplitud térmica ligera en el periodo del día. En los valles interandinos, el clima es frío boreal seco por encima de los 3000 m.s.n.m, con veranos lluviosos e inviernos secos con fuertes vientos en ciertas horas del día y con presencia de heladas en horas de la noche, cabe recalcar que el clima del distrito en estudio es predominante y acondiciona a las actividades agrícolas y pecuarias.

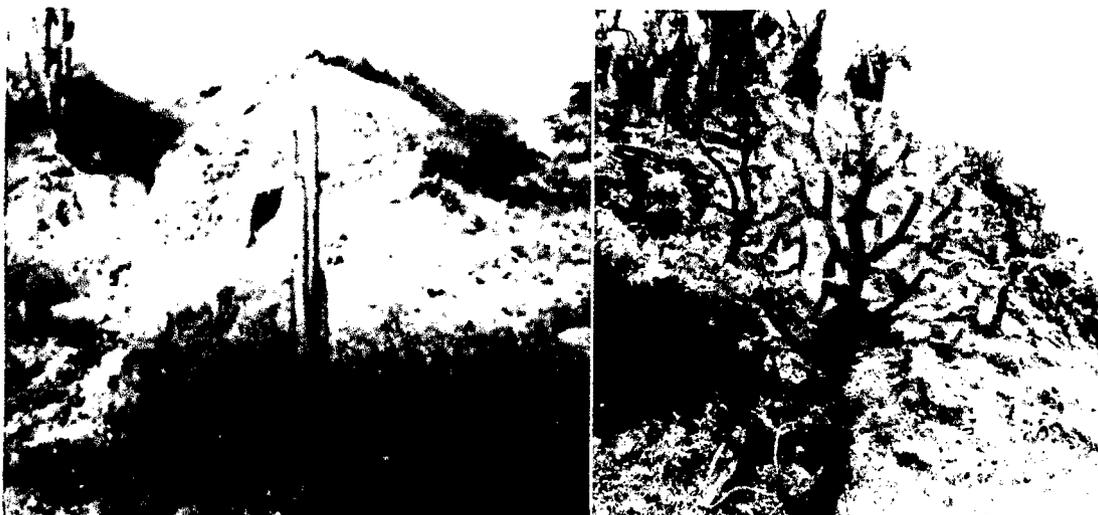
### 3.1.2 Biodiversidad

La unidad de mayor superficie es la vegetación arbustiva que se encuentra en los valles cuyas laderas o vertientes predominantes son, desde moderadamente empinadas hasta fuertemente empinadas, de 2425 msnm a 3000 m.s.n.m.



**Figura 3.2** Vegetación río Niño Yucaes –Muyurina (13°07'01"S 74°11'13"W).

La vegetación, se caracteriza por la presencia de asociaciones arbustivas de hasta 1,5 m de alto, las cuales se encuentran siguiendo un patrón de distribución espacial irregular, donde las especies se encuentran muy dispersas. Como vegetación de piso, se encuentra un tapiz herbáceo de vida efímera, conformada mayormente por gramíneas.



**Figura 3.3** Matorral semiárido con presencia de cactáceas columnares y de árboles de huarango (13°9'7,08"S 74°5'3,86"W).

En algunas porciones de las laderas se encuentran agrupaciones de especies arbóreas espinosas de porte muy achaparrado (hasta 2,5 m de alto), debido probablemente a las condiciones de extrema sequía que existen durante la mayor parte del año. Entre las especies se tiene la cabuya, cactus y huarango.

### **3.1.3 Geomorfología**

La zona de estudio presenta una geomorfología accidentada, con presencia de laderas altas y escarpadas erosionales y denudativas, piedemonte con pendientes moderadas y topografía ondulada, también presenta pequeños lugares planos y una diferencia altitudinal que oscila entre los 2150 m.s.n.m. en la parte más baja, hasta los 3600 m.s.n.m. en la parte más alta según el ZEE elaborado por el Gobierno Regional de Ayacucho en el año 2012. [id.22]

### **3.1.4 Demografía**

El distrito de Tambillo tiene una población aproximada de 7118 habitantes y su densidad habitacional de 17,67 hab./km<sup>2</sup>. Cuenta con veintisiete comunidades campesinas y dos anexos en su jurisdicción territorial según el ZEE elaborado por el Gobierno Regional de Ayacucho en el año 2012.

### **3.1.5 Actividad socioeconómica**

La principal actividad económica es la agricultura de autoconsumo y en menor proporción orientada al mercado local con productos de tallo corto, y la actividad pecuaria que complementa la economía familiar, principalmente mediante la crianza de ganado vacuno y animales menores.

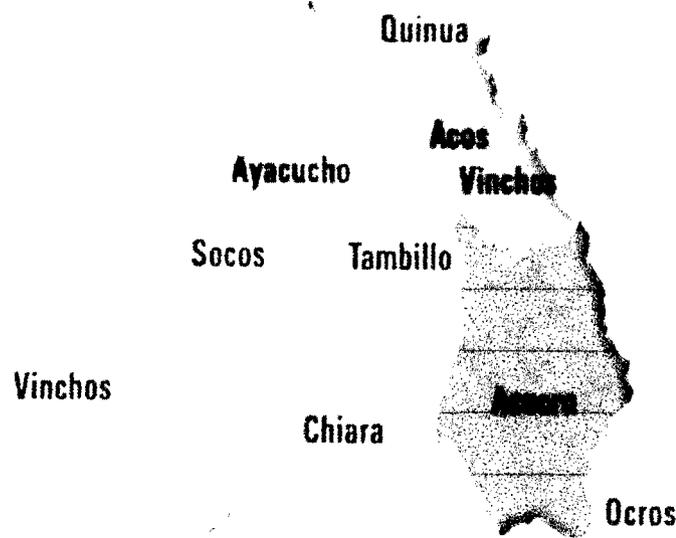
El distrito de Tambillo, en los últimos años tiene la necesidad de establecer políticas de ordenamiento territorial que parte de aspectos básicos como, resolver problemas críticos relacionados con la ocupación y uso agrícola del territorio, y articular a las diversas políticas sectoriales, para orientar el accionar del municipio de Tambillo en el cumplimiento eficiente de sus funciones, en bienestar de sus pobladores y estar en armonía con las condiciones ambientales y la seguridad física.

Según el ZEE de la región Ayacucho, el 80% de los pequeños productores del total del distrito, son considerados como productores de la economía de subsistencia, donde su principal actividad es la agricultura y ganadería, es así que al realizar el mal uso del suelo y malas prácticas agrícolas, tienen como consecuencia la desertificación y erosión de los suelos agrícolas. Frente a esta problemática del pequeño productor, el distrito de Tambillo fue intervenido por muchas instituciones, que no pudieron generar tecnologías adecuadas que permitan incrementar la producción y productividad de los pequeños productores. Las razones son variadas, desde la carencia de políticas institucionales, sectoriales y planificación territorial, que prioricen a los pequeños productores quienes deben ser orientados de acuerdo a la aptitud de su recurso suelo. [id.22]

### **3.1.6 Límites del distrito de Tambillo**

El distrito de Tambillo tiene como límites a los siguientes distritos de la provincia de Huamanga:

- Por el Norte, con los distritos de Quinua y Jesús Nazareno.
- Por Sur, con los distritos de Acocro y Chiara.
- Por Este, con los distritos de Acocro y Acosvinchos.
- Por Oeste, con los distritos de Ayacucho, Chiara y San Juan Bautista.



**Figura 3.4** Límite Político del distrito de Tambillo  
Fuente: ZEE. Gobierno Regional de Ayacucho, 2012

### **3.1.7 Datos de la estación meteorológica de Tambillo**

Los datos de la estación meteorológica de Tambillo fueron proporcionados por la Oficina de Operaciones y Mantenimiento (OPEMAN) que pertenece al Gobierno Regional de Ayacucho, cuyas variables son: temperatura y precipitación máxima y mínimas diarias desde enero 2000 a diciembre de 2012.

## **3.2 IMÁGENES SATELITALES UTILIZADAS**

Fueron utilizadas las imágenes producto MODIS Terra (MOD13Q1) del NDVI de la unidad de servicios geológicos USGS-MODIS Reprojection Tool Web Interface, éste servidor pertenece a la EOS y forma parte de las instituciones de la NASA. [23]

## Descarga de datos imagen del NDVI MODIS Terra (MOD13Q1)

Para el proceso de descarga de los datos en forma de imágenes; primeramente se tiene que suscribirse creando una cuenta personal.

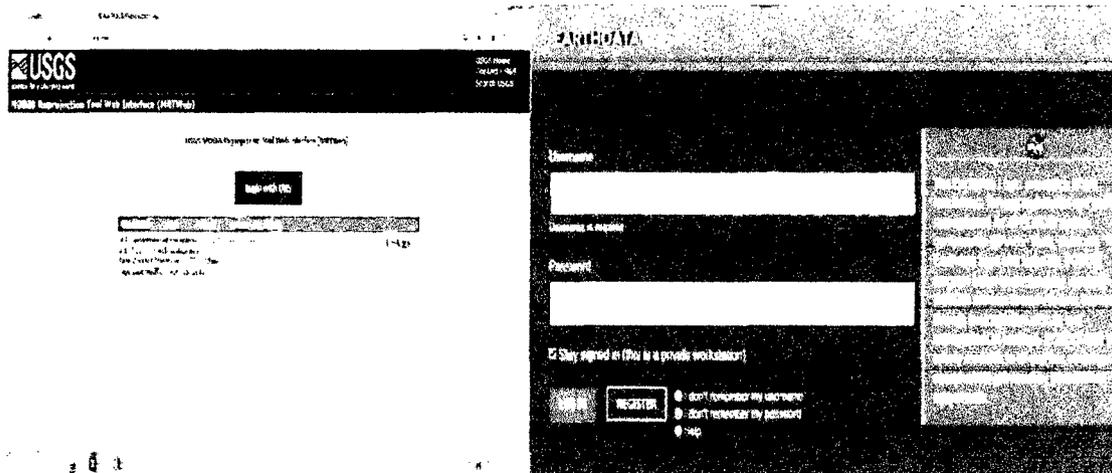


Figura 3.5 Ventana principal para suscribirse creando una cuenta personal o poner la contraseña

Una vez ingresado a la ventana de la plataforma de imágenes, se escoge el nombre del satélite para activar el producto a descargar que aparece en códigos, la resolución de la imagen, sensor de día y la fecha de la imagen, a continuación seleccionar la versión y adjuntar a la ventana de descarga como se muestra en la figura 3.6 y 3.7

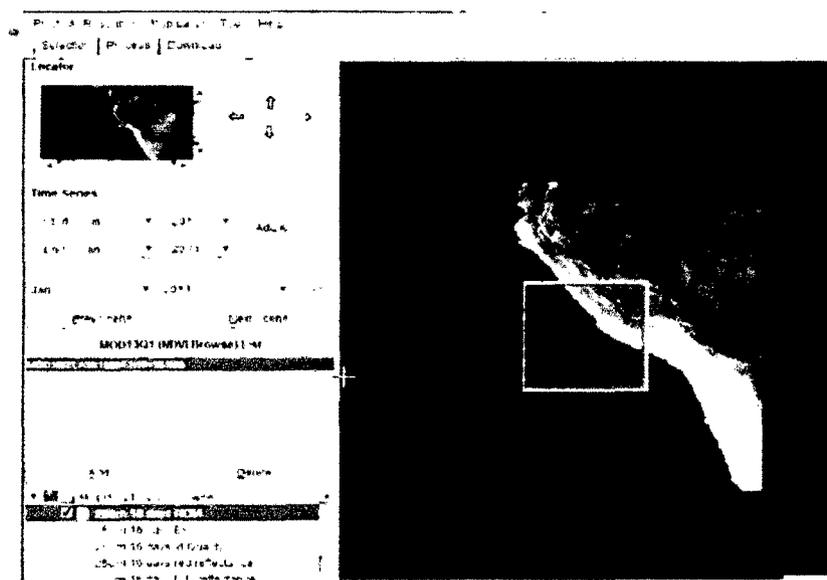


Figura 3.6 Ubicar la escena a descargar (noviembre 2013)

Producto a descargar: producto MODIS Terra/ MOD13Q1 (NDVI Brouse) de 250 m cada 16 días NDVI y la fecha.

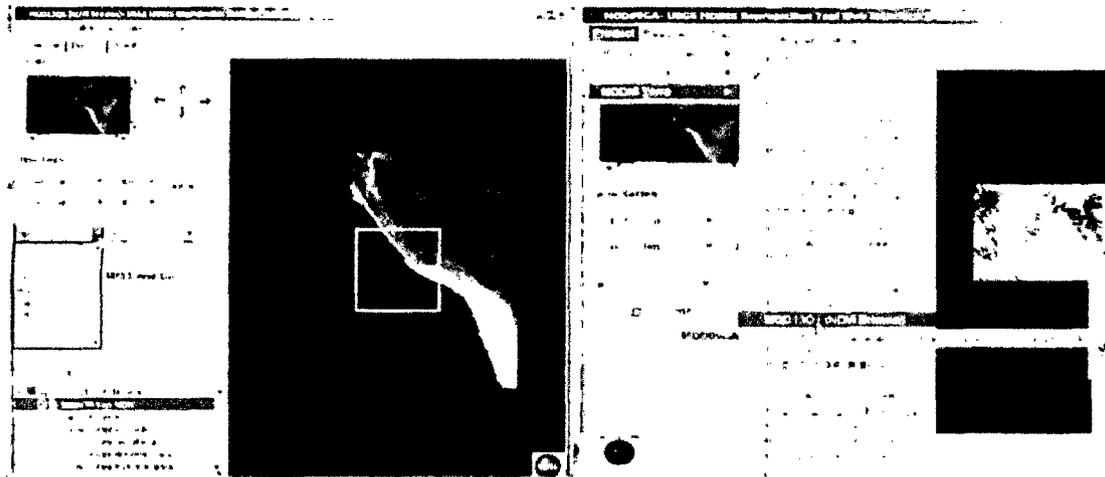


Figura 3.7 Ventana de descarga del producto MODIS Terra (noviembre 2013)

Finalmente en la ventana de procesos, se introducen los datos de proyección geográfica (WGS 84) tipo de archivo GEOTIFF del área de interés:

Upper Left: latitud -12 y longitud -76

Lower Right: latitud -16 longitud -71

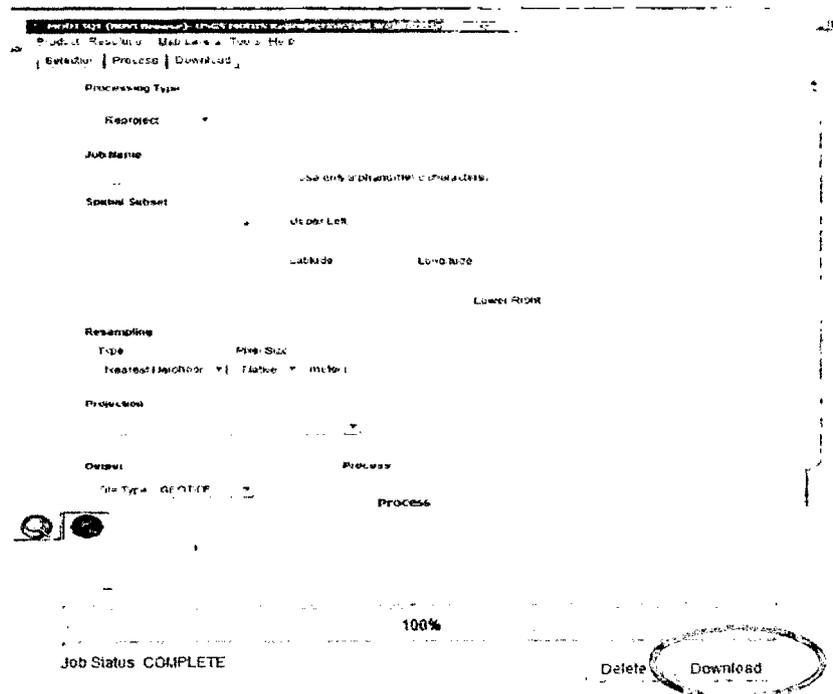


Figura 3.8 Descarga final de imágenes MODIS Terra (noviembre 2013)

### **3.3 PROCESAMIENTO DE LAS IMÁGENES SATELITALES**

#### **3.3.1 Algoritmo y programas**

**Software ENVI.** El software ENVI (Ambiente para Visualizar Imágenes), es el software ideal para la visualización y análisis de datos científicos e imágenes satelitales. El programa de proceso de imágenes digitales incluye herramientas avanzadas para el análisis espectral, corrección geométrica, análisis de terreno, análisis de radar, y capacidades de Sistema de Información Geográfica (SIG) vectorial, apoyo amplio para acceder a imágenes de una amplia variedad de fuentes. [24]

El programa está completamente escrito en **IDL** (siglas en inglés de Interactive Data Lenguaje).

**Sistema de Información Geográfica (SIG).** Sistema de hardware, software y procedimientos elaborados para facilitar la obtención, gestión, manipulación, análisis, modelado, representación y salida de datos espacialmente georreferenciados, para resolver problemas complejos de planificación y gestión.

**Software ArcGIS.** Los productos ArcGIS son un conjunto de aplicaciones utilizadas para compilar información geográfica, crear mapas, realizar análisis y llevar a cabo proyectos importantes. Es utilizada a través de tres aplicaciones ArcMap, ArcCatalogo y ArcToolbox.

#### **3.3.2 Tratamiento digital de las imágenes MODIS Terra**

El tratamiento digital de imágenes se realiza mediante el uso de software ENVI, IDL y ArcGIS de las cuentas digitales contenidas en una imagen para los propósitos de su corrección, perfeccionamiento y/o extracto del rasgo. La unidad visual más pequeña que se puede visualizar en una imagen se denomina pixel; el sensor detecta la radiancia media de una parcela de terreno equivalente al tamaño del pixel.

El proceso de grabación de la energía electromagnética que conforman una imagen se realiza mediante unos sistemas fotoelectrónicos específicos que generan una señal de

corriente eléctrica cuya intensidad es directamente proporcional a la radiancia detectada en un determinado rango de longitud de onda, ángulo y en un determinado instante.

Cada píxel tiene un valor numérico entero o real, que corresponde al nivel digital percibido, el cual se traduce en un valor de gris en la pantalla o nivel visual. El arreglo de varios píxeles genera la imagen que se puede interpretar como una matriz con coordenadas, la columna, cuyo valor (o valores) de celda corresponden a la dimensión espectral. El valor del píxel se traduce a un valor numérico al que llamamos nivel digital (ND), que están comprendidos entre 0 y  $k-1$  valores, siendo  $k$  el margen dinámico del sistema determinado a su vez por su resolución radiométrica. Cada píxel se define por un byte y éstos están descritos con arreglos de 12 bits asignado con 4096 niveles digitales posibles ( $k=2^{12}$ , o sea de 0 a 4095 niveles de grises) para las imágenes MODIS. Se ha elaborado el algoritmo en ENVI-IDL (ver anexo 01), para el mosaico de las 341 imágenes y realizar el corte según el vector del área en estudio y obtener el promedio espacial.

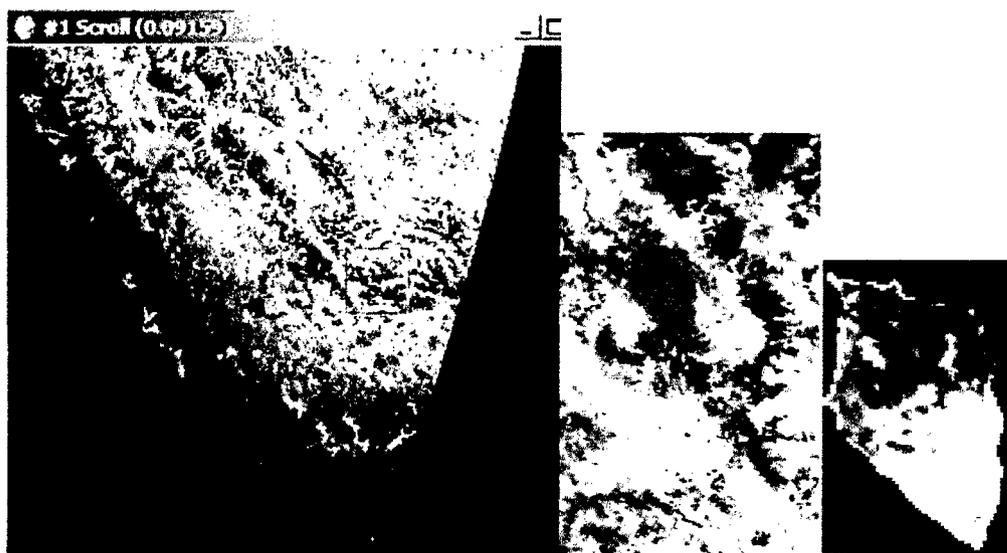
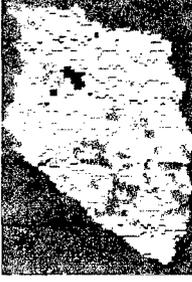
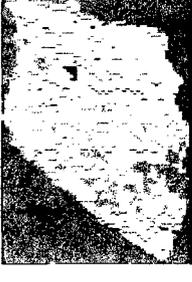
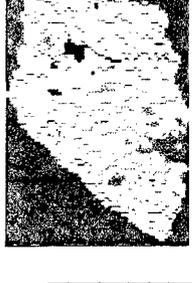


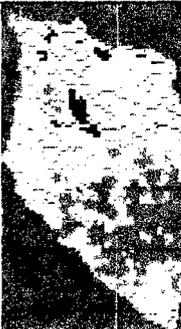
Figura 3.9 Creación de ventana para corte del área de estudio (vector Tambillo)

### 3.3.3 Selección de muestras de las imágenes descargadas

Para la selección aleatoria de un subconjunto de observaciones de las áreas de población objetivo según las 341 imágenes satelitales descargadas MODIS Terra (MOD13Q1), se han agrupado seis imágenes por estaciones del año (dos por mes). La clasificación de las imágenes para verano comprende los meses de diciembre, enero y febrero, para otoño comprende marzo, abril y mayo, para invierno los meses de junio,

julio, agosto y para la estación de primavera los meses de setiembre, octubre y noviembre, desde enero del 2000 a diciembre del 2014.

AÑO	VERANO	OTOÑO	INVIERNO	PRIMAVERA
2000				
2001				
2002				
2003				
2004				

2005				
2006				
2007				
2008				
2009				

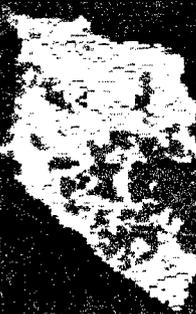
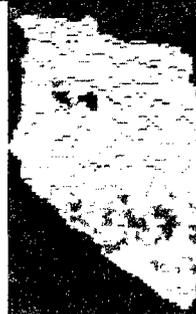
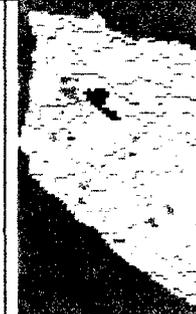
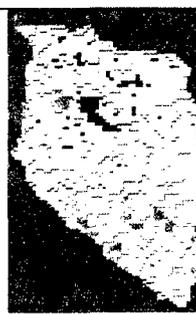
2010				
2011				
2012				
2013				
2014				

Figura 3.10 Aplicación del software ENVI al apilado y corte de las 341 imágenes

### 3.3.4 Procesamiento de imágenes satelitales MODIS Terra (MOD13Q1)

La tesis se trabajó con datos imagen en archivo GEOTIFF y vectorial, seleccionado aleatoriamente los pixeles de las imágenes dentro del área de estudio según el NDVI, para ello se elaboró códigos y/o algoritmos en lenguaje de programación IDL; la cual facilita el procesamiento de un conjunto de imágenes obtenidas que deben estar en el mismo formato, con pixeles del mismo tamaño y parámetro de estudio a escala grises con escenas de las mismas dimensiones y correcciones mínimas exigidas según el nivel de procesamiento. Teniendo en cuenta los datos anteriores se calcula el NDVI promedio estacional. (ver anexo 03)

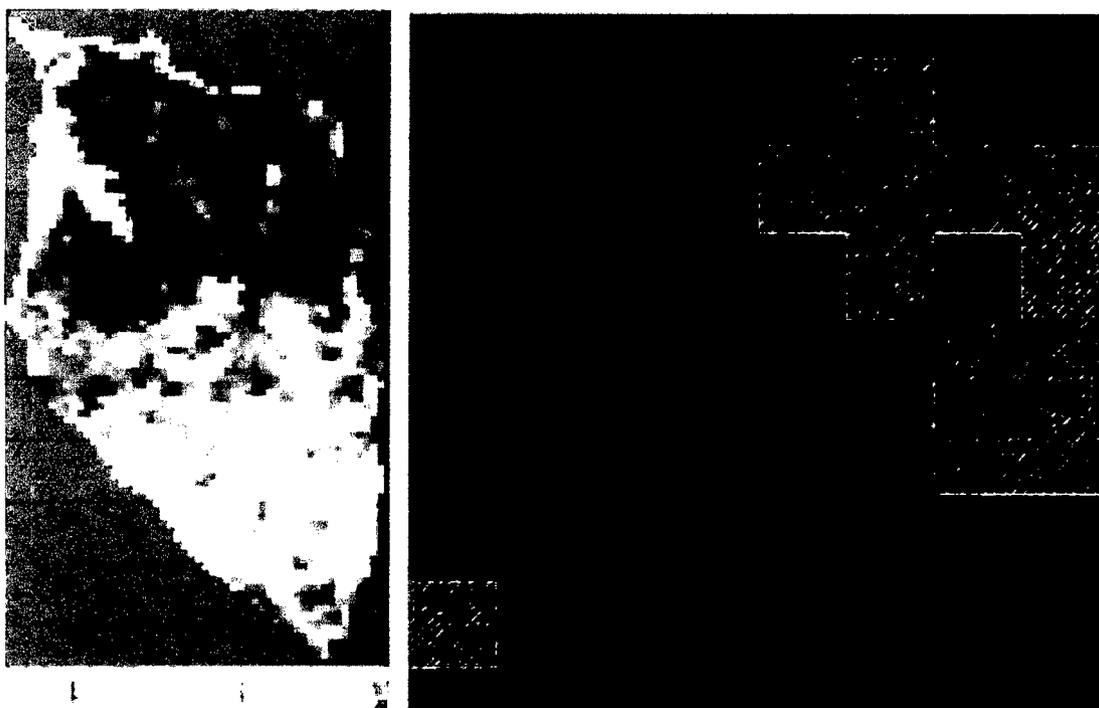


Figura 3.11 Selección de pixeles en km<sup>2</sup> de la cobertura vegetal

### 3.3.5 Clasificación de la vegetación según el tipo de suelo

Para la clasificación de los tipos de cobertura vegetal se tomó como fuente la clasificación de INRENA (Instituto Nacional de Recursos Naturales del Perú) conjuntamente con los resultados obtenidos del estudio de la cobertura del suelo de la Organización de las Naciones Unidas para la Alimentación y Agricultura (FAO) [25], que son las siguientes:

Tabla 3.1 Clasificación de la cobertura vegetal. [id.25]

Código	Descripción	Detalle
A	Suelos escasamente vegetados [0,0000-0,0799 (rojo)]	Comprende la zona de matorrales.
B	Bosque seco tropical abierto [0,080-0,139 (verde)]	Bosque Seco ralo y de llanura eólica.
C	Puna [0,140-0,199 (azul)]	Terreno abierto y llano, de clima subglacial y subsuelo helado, falta de vegetación arbórea.
D	Bosque caduco seco estacional tropical [0,200-0,259 (amarillo)]	Bosque seco ralo de lomadas y colinas.
E	Montaña degradada de bosques caduco bajo con arbustos caducos [0,260-0,319 (caeste)]	Bosque seco ralo de superficies discontínuas
F	Suelos agrícolas [0,320-0,379 (magenta)]	Bosque seco semidenso de colinas.
G	Bosque de hoja ancha y perenne [0,3800-0,4390 (marrón)]	Bosque seco ralo de llanura aluvial.
H	Prado andino con bosque de hoja perenne [0,4400-0,5000 (verde oscuro)]	Follaje anual, son porciones de suelo donde se encuentra agricultura o prado.

### 3.4 MÉTODO

El método de la investigación se inició con la descarga de 23 y 24 imágenes por año obteniéndose en los 15 años un total de 341 imágenes MODIS Terra (MOD13Q1) de la página [www.gfcs.nasa.gov](http://www.gfcs.nasa.gov). Para luego ser apiladas y cortadas con el mapa vectorial de la zona en estudio, haciendo uso del software ENVI-IDL. Se agrupó seis imágenes de acuerdo al periodo de estaciones del año (verano, otoño, invierno y primavera). Se procesaron las imágenes utilizando software ENVI 4,8 y ArcGIS 10,0 determinándose el NDVI por cada tipo de suelo y el área ocupada.

La metodología utilizada fue un enfoque cuantitativo en su fase descriptiva correlacional y diseño metodológico no experimental.

El planteamiento de la Hipótesis:

**$H_0$**  : La evaluación de impacto de uso de suelo según el Índice de Vegetación de Diferencia Normalizada mediante imágenes satelitales, presentará un decaimiento en la dinámica de la vegetación en el distrito de Tambillo-Ayacucho en el periodo 2000-2014.

**$H_a$**  : La evaluación de impacto de uso de suelo según el Índice de Vegetación de Diferencia Normalizada mediante imágenes satelitales, presentará una mejora en la dinámica de la vegetación en el distrito de Tambillo-Ayacucho en el periodo 2000-2014.

Los instrumentos de recolección y medición de los datos de las imágenes fueron el uso del software ENVI 4,8, ArcGIS 10,0 y Excel para el procesamiento de datos estadísticos.

## **CAPÍTULO IV**

### **RESULTADOS**

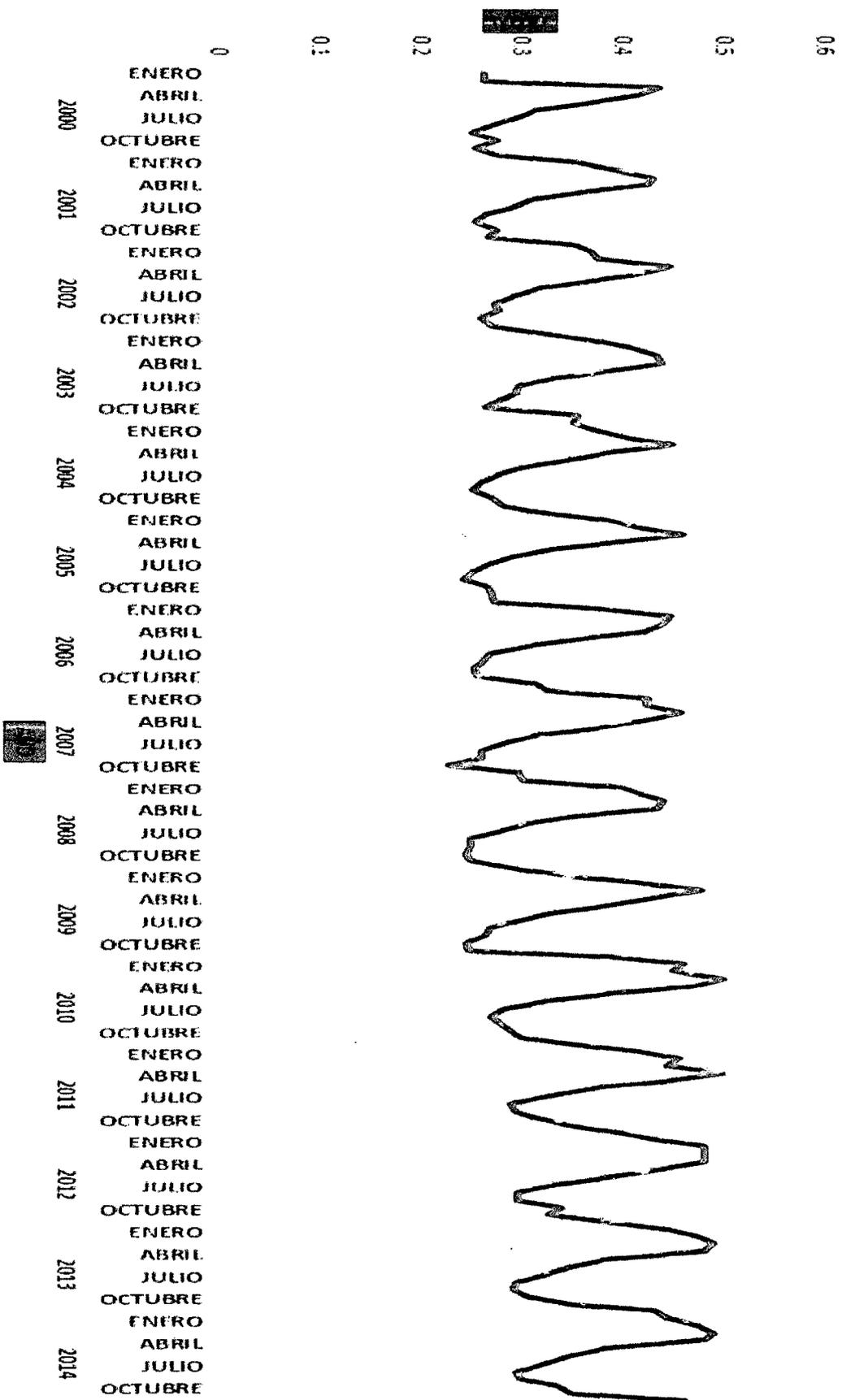
En este capítulo se presentan los resultados obtenidos de la evolución temporal del Índice de Vegetación de Diferencia Normalizada (NDVI) cuyo seguimiento de la cobertura vegetal y uso actual del suelo a través del tiempo se observan en las figuras presentadas, siguiendo la siguiente estructura. Primeramente se muestra en la figura 4.1 el resultado estadístico descriptivo de la evolución temporal de la variable dependiente (NDVI) y la variable independiente (uso de suelos) por meses, durante el periodo 2000 al 2014. En segundo lugar en la figura 4.2 se expone la evolución temporal por tipo de cobertura vegetal en estaciones del año, según el NDVI. Las figuras 4.3 al 4.9 muestran la evolución temporal de los tipos de cobertura de vegetación según la clasificación de la Organización de las Naciones Unidas para la Alimentación y Agricultura (FAO). Por último para la validación de los resultados en las figuras 4.10 y 4.11 muestran la evolución temporal de la precipitación y temperatura atmosférica con datos obtenidos de la estación meteorológica de Tambillo, con los cuales se contrasta y valida los resultados del NDVI los que son mostrados en las figuras 4.12 y 4.13.

## 4.1 EVOLUCIÓN TEMPORAL DEL NDVI EN EL PERIODO 2000-2014

Tabla 4.1 Datos del NDVI por meses del periodo 2000-2014

	NDVI-2000	NDVI-2003	NDVI-2006	NDVI-2009	NDVI-2012
ENERO	0,26378833	0,37767726	0,37589086	0,34701968	0,43568894
FEBRERO	0,26378833	0,40882694	0,44791472	0,42278845	0,48232154
MARZO	0,43862873	0,43658231	0,44132406	0,47858254	0,48102903
ABRIL	0,41527119	0,44053618	0,422287	0,4356158	0,48093257
MAYO	0,36820227	0,3885463	0,36635914	0,39061799	0,43493953
JUNIO	0,31377959	0,33545595	0,31045397	0,33140525	0,38215896
JULIO	0,29910911	0,29875802	0,27095746	0,29756865	0,33532116
AGOSTO	0,27300529	0,29560963	0,26318164	0,26945956	0,29702126
SETIEMBRE	0,25294085	0,27830824	0,25542056	0,26690400	0,29737537
OCTUBRE	0,27708051	0,26505625	0,25792867	0,24637990	0,3393302
NOVIEMBRE	0,25543000	0,35803354	0,31549416	0,24854161	0,32735682
DICIEMBRE	0,27487314	0,35394609	0,32701208	0,38547943	0,38276417
	NDVI-2001	NDVI-2004	NDVI-2007	NDVI-2010	NDVI-2013
ENERO	0,35919770	0,37660260	0,42712963	0,46134325	0,44512355
FEBRERO	0,39337590	0,40846741	0,42587622	0,45104076	0,47571824
MARZO	0,43095871	0,45147538	0,45966443	0,50119476	0,48997482
ABRIL	0,42615249	0,3888785	0,42220781	0,47192389	0,48123435
MAYO	0,36111240	0,34650658	0,37336669	0,39552050	0,38327731
JUNIO	0,31006495	0,29884239	0,31553488	0,32647220	0,34615214
JULIO	0,29123367	0,27943724	0,28477859	0,28407508	0,32303685
AGOSTO	0,26618944	0,26140616	0,26206631	0,27123756	0,29504933
SETIEMBRE	0,25568157	0,25366627	0,26174051	0,27880843	0,29282792
OCTUBRE	0,27630376	0,27364464	0,22977520	0,29020574	0,30675912
NOVIEMBRE	0,26722712	0,28395697	0,29802634	0,30071108	0,34872026
DICIEMBRE	0,35594273	0,3188637	0,30398859	0,35825636	0,43198675
	NDVI-2002	NDVI-2005	NDVI-2008	NDVI-2011	NDVI-2014
ENERO	0,37101486	0,3848905	0,40057058	0,41722388	0,44512355
FEBRERO	0,37818231	0,41519685	0,42049905	0,45767691	0,47571824
MARZO	0,44974873	0,46262290	0,44255778	0,44541601	0,48997482
ABRIL	0,41560352	0,40453876	0,43550797	0,49928663	0,48123435
MAYO	0,36954671	0,33328395	0,35098173	0,44384243	0,38327731
JUNIO	0,31848436	0,29279504	0,30384729	0,37598715	0,34615214
JULIO	0,29506802	0,26900754	0,28032774	0,33046163	0,32303685
AGOSTO	0,27521371	0,25435987	0,24997438	0,28994684	0,29504933
SETIEMBRE	0,27853659	0,24497247	0,25176988	0,29541616	0,29827915
OCTUBRE	0,26259479	0,26865543	0,24652669	0,31363012	0,33675912
NOVIEMBRE	0,27254313	0,27359785	0,25186167	0,34600574	0,34872026
DICIEMBRE	0,32399499	0,27550334	0,29342117	0,39766929	0,46198675

Figura 4.1 Evolución temporal de tendencia positiva del NDVI por meses del año durante el periodo 2000 al 2014



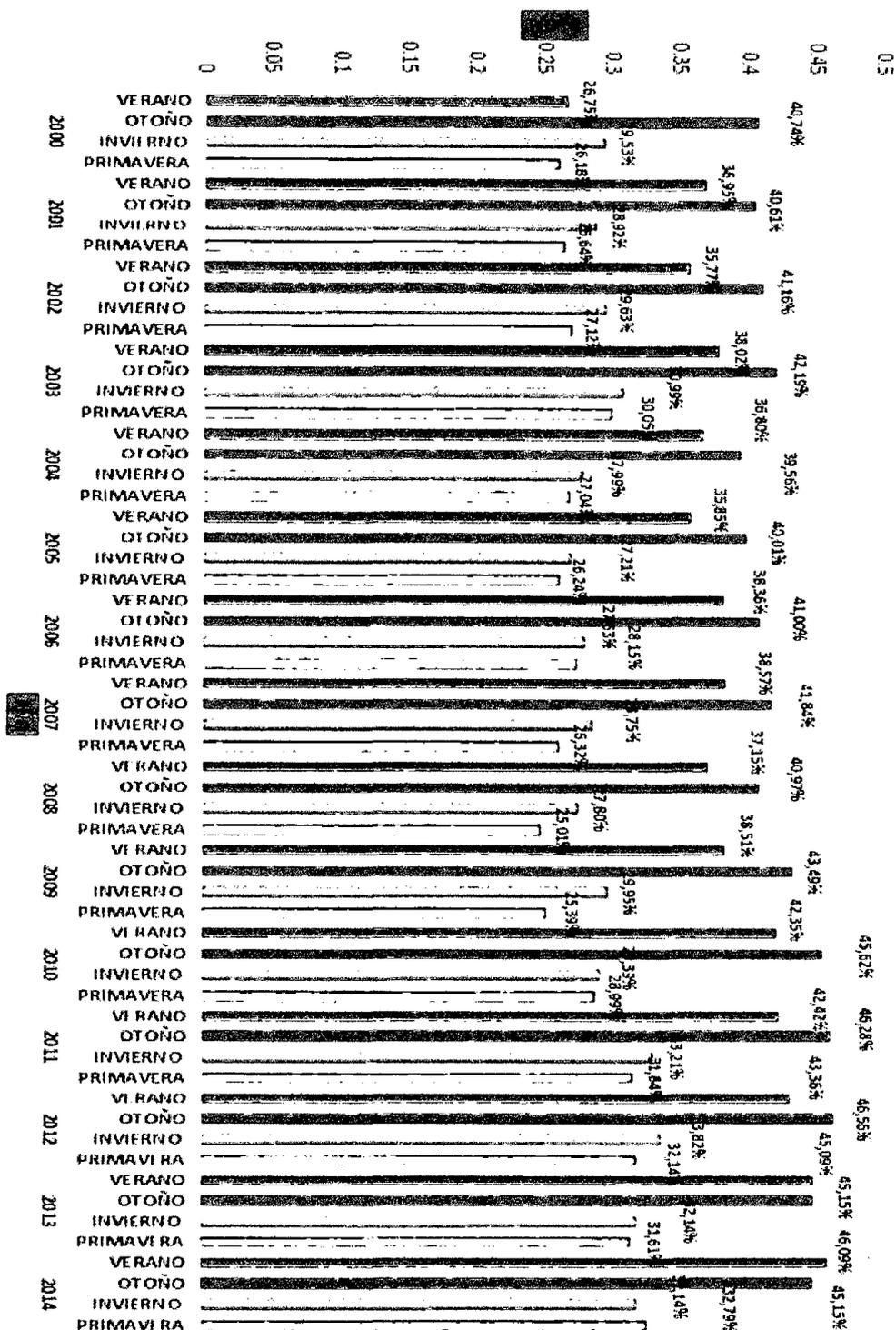
En la tabla 4.1 y figura 4.1 se muestran los valores del NDVI por meses del año donde se observa una tendencia de crecimiento positivo llegando a un NDVI de valor más alto de 0,50119476 en el mes de marzo del 2010 y mínimo de 0,2297752 en el mes de octubre del 2007. Teniendo en cuenta que se utilizó la ecuación 2.20 y el promedio del NDVI de dos imágenes al mes. Los meses que no hay lluvias, el NDVI es menor (escasa vegetación mes de octubre) y meses después de las lluvias el NDVI es mayor (incremento de la vegetación mes de marzo).

#### 4.2 EVOLUCIÓN TEMPORAL DEL ÁREA DE COBERTURA VEGETAL SEGÚN EL NDVI POR ESTACIONES DEL AÑO.

Tabla 4.2 Datos del NDVI por estaciones del año, 2000-2014

AÑO	ESTACIÓN	NDVI	AÑO	ESTACIÓN	NDVI
<b>2000</b>	VERANO	0,267483265	<b>2008</b>	VERANO	0,371496928
	OTOÑO	0,407367395		OTOÑO	0,409682490
	INVIERNO	0,295297992		INVIERNO	0,278049803
	PRIMAVERA	0,261817118		PRIMAVERA	0,250052745
<b>2001</b>	VERANO	0,369505443	<b>2009</b>	VERANO	0,385095850
	OTOÑO	0,406074530		OTOÑO	0,434938775
	INVIERNO	0,289162685		INVIERNO	0,299477818
	PRIMAVERA	0,266404148		PRIMAVERA	0,253941835
<b>2002</b>	VERANO	0,357730717	<b>2010</b>	VERANO	0,423546787
	OTOÑO	0,411632983		OTOÑO	0,456213045
	INVIERNO	0,296255362		INVIERNO	0,293928278
	PRIMAVERA	0,271224837		PRIMAVERA	0,289908417
<b>2003</b>	VERANO	0,380150095	<b>2011</b>	VERANO	0,424190025
	OTOÑO	0,421888262		OTOÑO	0,462848353
	INVIERNO	0,309941200		INVIERNO	0,332131872
	PRIMAVERA	0,300466010		PRIMAVERA	0,318350673
<b>2004</b>	VERANO	0,367977902	<b>2012</b>	VERANO	0,433591550
	OTOÑO	0,395620152		OTOÑO	0,465633708
	INVIERNO	0,279895260		INVIERNO	0,338167123
	PRIMAVERA	0,270422625		PRIMAVERA	0,321354128
<b>2005</b>	VERANO	0,358530228	<b>2013</b>	VERANO	0,450942843
	OTOÑO	0,400148532		OTOÑO	0,451495493
	INVIERNO	0,272054148		INVIERNO	0,321412770
	PRIMAVERA	0,262408582		PRIMAVERA	0,316102432
<b>2006</b>	VERANO	0,383605885	<b>2014</b>	VERANO	0,460942843
	OTOÑO	0,409990065		OTOÑO	0,451495493
	INVIERNO	0,281531022		INVIERNO	0,321412770
	PRIMAVERA	0,276281127		PRIMAVERA	0,327919510
<b>2007</b>	VERANO	0,385664810			
	OTOÑO	0,418412973			
	INVIERNO	0,287459925			
	PRIMAVERA	0,263180683			

Figura 4.2 Evolución temporal de la cobertura vegetal según el NDVI en porcentajes por estaciones del año, período 2000-2014



En la tabla 4.2 y figura 4.2 se muestra la evolución temporal de la vegetación por estaciones del año. En primavera del 2008 se observa un menor porcentaje de 25,01% del NDVI (escasa vegetación). En otoño del 2012 el más alto NDVI con 46,56% (incremento de la vegetación). En consecuencia, del 2000 al 2014, en la estación de verano y otoño se tiene suelos con mayor vegetación, y suelos con menor vegetación en invierno y primavera.

#### 4.3 EVOLUCIÓN TEMPORAL DEL TIPO DE COBERTURA VEGETAL POR km<sup>2</sup>

##### Vegetación tipo A (NDVI 0,000-0,0799)

Los datos de las imágenes satelitales del 2000-2014, no cuentan con áreas de cobertura vegetal de suelos escasamente vegetados, por lo cual no se muestran la información estadística.

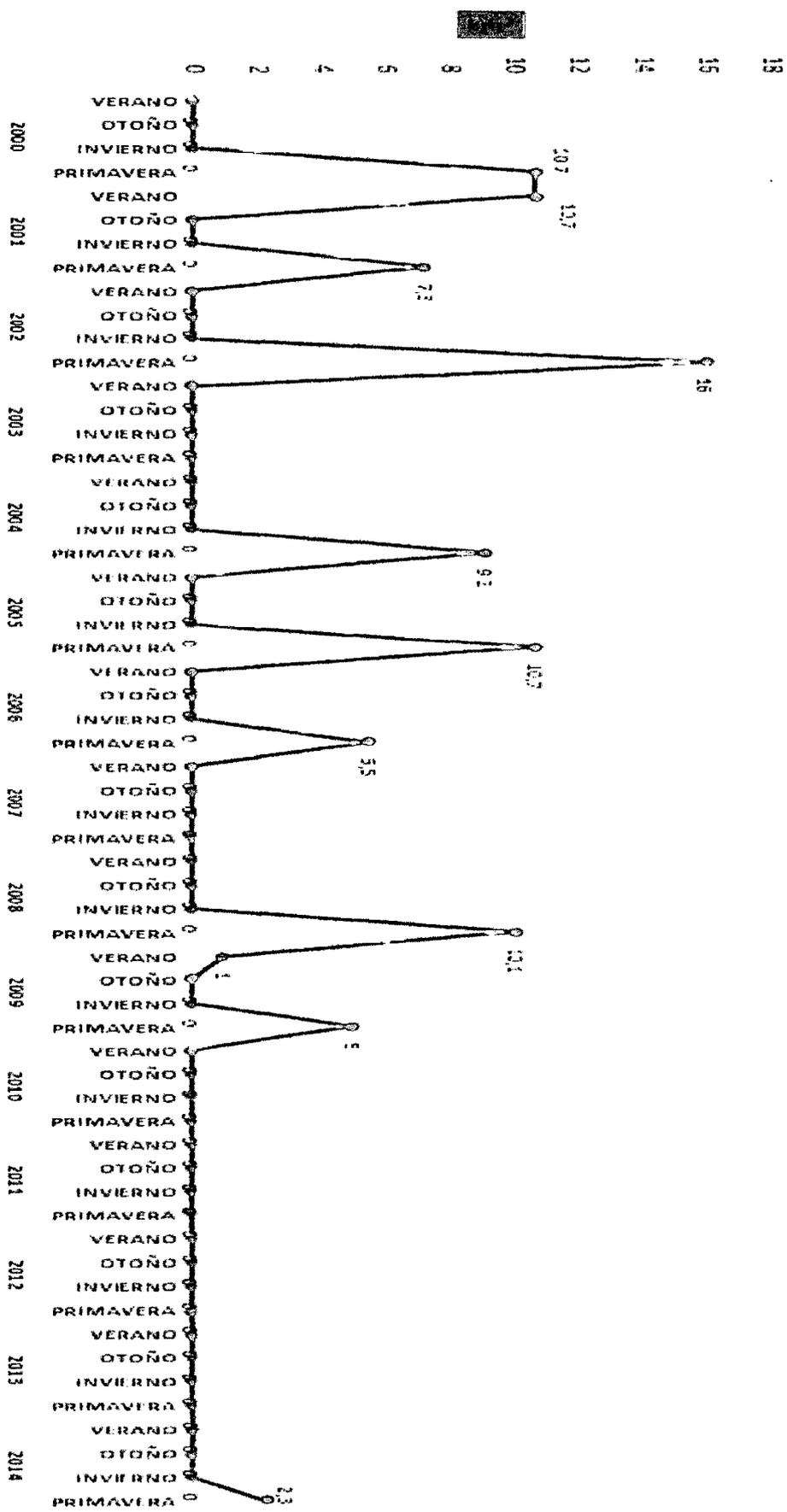
##### Vegetación tipo B (NDVI 0,080-0,139)

En la tabla 4.3 y figura 4.3 muestran la información estadística de la cobertura vegetal por estación del año, donde solo en la estación de primavera hubo cobertura vegetal del 2000 al 2009, destacando el 2002 que hubo un mayor área de 16 km<sup>2</sup>, luego de ello no se observa el uso de suelo de cobertura vegetal de bosque seco, hasta la primavera del 2014, que muestra un área 2,3 km<sup>2</sup> de este tipo de vegetación.

Tabla 4.3 Datos del área de vegetación tipo B por estaciones del año, 2000-2014

AÑO	ESTACIÓN	ÁREA(km <sup>2</sup> )	AÑO	ESTACIÓN	ÁREA(km <sup>2</sup> )
<b>2000</b>	VERANO	0	<b>2008</b>	VERANO	0
	OTOÑO	0		OTOÑO	0
	INVIERNO	0		INVIERNO	0
	PRIMAVERA	10,7		PRIMAVERA	10,1
<b>2001</b>	VERANO	10,7	<b>2009</b>	VERANO	1
	OTOÑO	0		OTOÑO	0
	INVIERNO	0		INVIERNO	0
	PRIMAVERA	7,3		PRIMAVERA	5
<b>2002</b>	VERANO	0	<b>2010</b>	VERANO	0
	OTOÑO	0		OTOÑO	0
	INVIERNO	0		INVIERNO	0
	PRIMAVERA	16		PRIMAVERA	0
<b>2003</b>	VERANO	0	<b>2011</b>	VERANO	0
	OTOÑO	0		OTOÑO	0
	INVIERNO	0		INVIERNO	0
	PRIMAVERA	0		PRIMAVERA	0
<b>2004</b>	VERANO	0	<b>2012</b>	VERANO	0
	OTOÑO	0		OTOÑO	0
	INVIERNO	0		INVIERNO	0
	PRIMAVERA	9,2		PRIMAVERA	0
<b>2005</b>	VERANO	0	<b>2013</b>	VERANO	0
	OTOÑO	0		OTOÑO	0
	INVIERNO	0		INVIERNO	0
	PRIMAVERA	10,7		PRIMAVERA	0
<b>2006</b>	VERANO	0	<b>2014</b>	VERANO	0
	OTOÑO	0		OTOÑO	0
	INVIERNO	0		INVIERNO	0
	PRIMAVERA	5,5		PRIMAVERA	2,3
<b>2007</b>	VERANO	0			
	OTOÑO	0			
	INVIERNO	0			
	PRIMAVERA	0			

Figura 4.3 Evolución temporal de la cobertura vegetal del tipo B (bosque seco) en km<sup>2</sup> periodo 2000-2014.



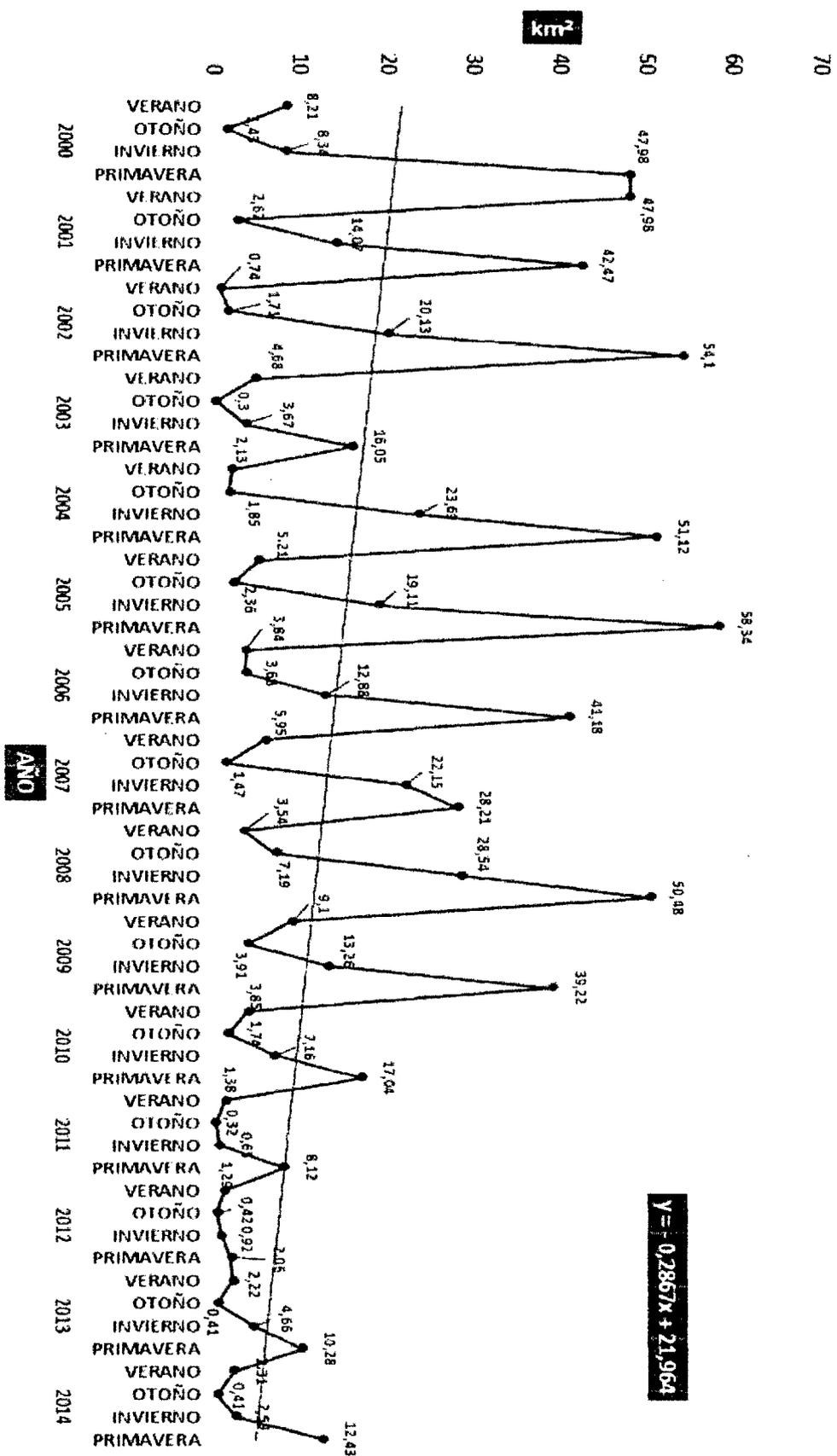
### Vegetación tipo C (NDVI 0,140-0,199)

En la tabla 4.4 y figura 4.4 muestran la información estadística con una mayor cobertura vegetal en suelo escasamente vegetado en la estación de primavera el año 2005 con 58,34 km<sup>2</sup>, luego de ello hubo un decaimiento de la vegetación de 0,3 km<sup>2</sup> en otoño del 2003, por lo que se tiene como resultado una pendiente negativa del 2000 al 2014. La negación de la hipótesis general planteada lleva a determinar que el comportamiento fenológico de los otros tipos de vegetación (E-F-G-H) según el NDVI tuvo un impacto positivo. En consecuencia, en la estación de primavera se observa mayor área de vegetación, decayendo del 2000 al 2014 y la menor área de vegetación en otoño.

Tabla 4.4 Datos del área de vegetación tipo C por estaciones del año, 2000-2014

AÑO	ESTACIÓN	ÁREA(km <sup>2</sup> )	AÑO	ESTACIÓN	ÁREA(km <sup>2</sup> )
<b>2000</b>	VERANO	8,21	<b>2008</b>	VERANO	3,54
	OTOÑO	1,43		OTOÑO	7,19
	INVIERNO	8,34		INVIERNO	28,54
	PRIMAVERA	47,98		PRIMAVERA	50,48
<b>2001</b>	VERANO	47,98	<b>2009</b>	VERANO	9,1
	OTOÑO	2,67		OTOÑO	3,91
	INVIERNO	14,07		INVIERNO	13,26
	PRIMAVERA	42,47		PRIMAVERA	39,22
<b>2002</b>	VERANO	0,74	<b>2010</b>	VERANO	3,85
	OTOÑO	1,71		OTOÑO	1,74
	INVIERNO	20,13		INVIERNO	7,16
	PRIMAVERA	54,1		PRIMAVERA	17,04
<b>2003</b>	VERANO	4,68	<b>2011</b>	VERANO	1,38
	OTOÑO	0,3		OTOÑO	0,32
	INVIERNO	3,67		INVIERNO	0,65
	PRIMAVERA	16,05		PRIMAVERA	8,12
<b>2004</b>	VERANO	2,13	<b>2012</b>	VERANO	1,29
	OTOÑO	1,85		OTOÑO	0,42
	INVIERNO	23,69		INVIERNO	0,92
	PRIMAVERA	51,12		PRIMAVERA	2,06
<b>2005</b>	VERANO	5,21	<b>2013</b>	VERANO	2,22
	OTOÑO	2,36		OTOÑO	0,41
	INVIERNO	19,11		INVIERNO	4,66
	PRIMAVERA	58,34		PRIMAVERA	10,28
<b>2006</b>	VERANO	3,84	<b>2014</b>	VERANO	2,31
	OTOÑO	3,68		OTOÑO	0,41
	INVIERNO	12,88		INVIERNO	2,59
	PRIMAVERA	41,18		PRIMAVERA	12,43
<b>2007</b>	VERANO	5,95			
	OTOÑO	1,47			
	INVIERNO	22,15			
	PRIMAVERA	28,21			

Figura 4.4 Evolución temporal de tendencia negativa de la cobertura vegetal tipo C (suelo escasamente vegetado) en km<sup>2</sup> según estaciones del año en el periodo 2000-2014.



### Vegetación tipo D (NDVI 0,200-0,259)

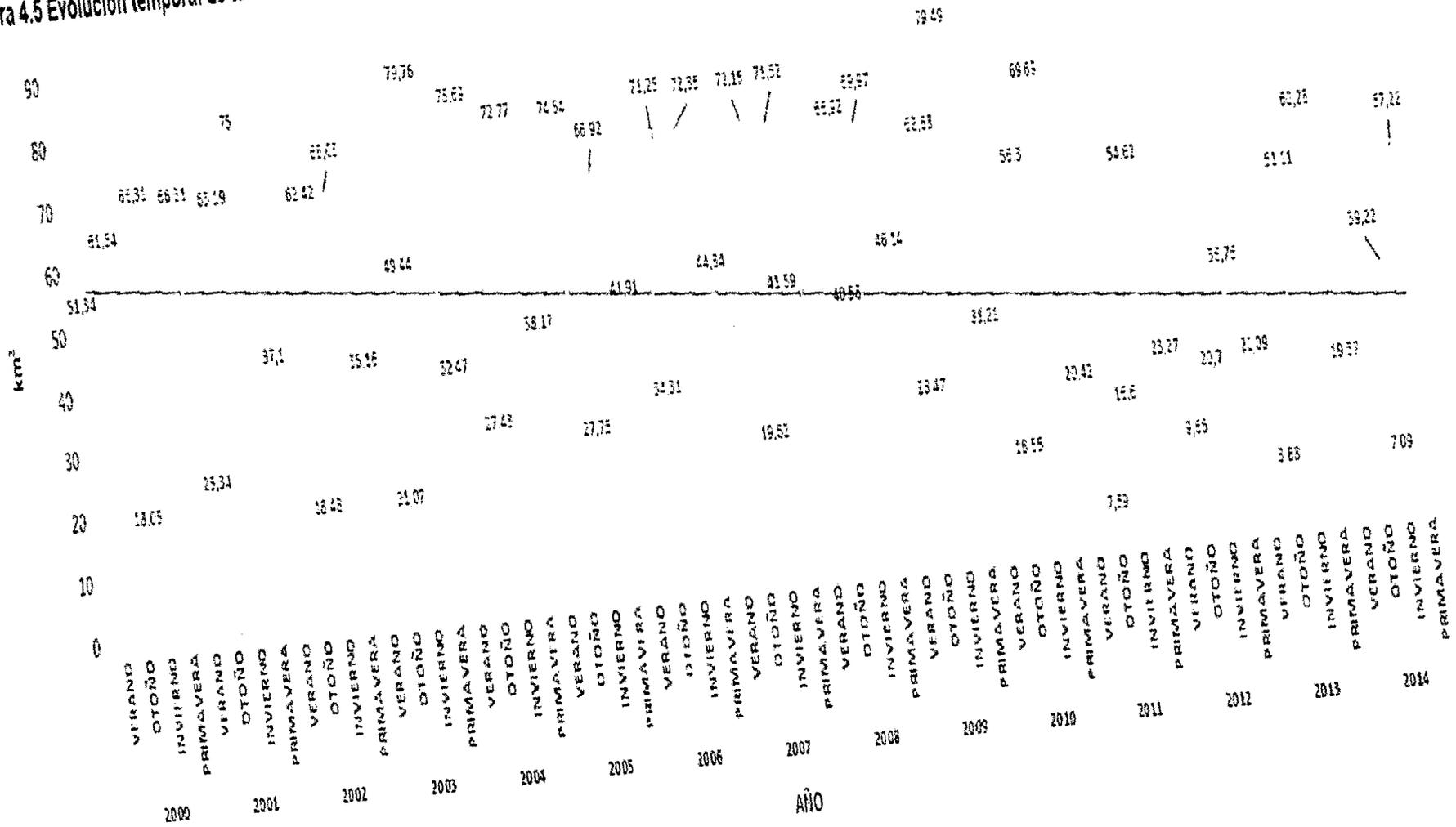
En la tabla 4.5 y figura 4.5 muestran la información estadística de un decaimiento de la cobertura vegetal de bosque caduco seco en km<sup>2</sup>. Se observa un área de vegetación menor de 3,88 km<sup>2</sup> en otoño del 2013 y el mayor en primavera del 2003 de 79,76 km<sup>2</sup>. Como resultado se observa una pendiente negativa del 2000 al 2014. La negación de la hipótesis planteada nos lleva a determinar que el comportamiento fenológico de los otros tipos de vegetación (E-F-G-H) según NDVI tuvo un impacto positivo.

Tabla 4.5 Datos del área de vegetación tipo D por estaciones del año, 2000-2014

AÑO	ESTACIÓN	ÁREA(km <sup>2</sup> )	AÑO	ESTACIÓN	ÁREA(km <sup>2</sup> )
2000	VERANO	51,34	2008	VERANO	41,59
	OTOÑO	18,05		OTOÑO	40,58
	INVIERNO	61,54		INVIERNO	66,92
	PRIMAVERA	66,31		PRIMAVERA	69,97
2001	VERANO	66,31	2009	VERANO	46,14
	OTOÑO	25,34		OTOÑO	28,47
	INVIERNO	63,19		INVIERNO	62,88
	PRIMAVERA	75		PRIMAVERA	79,49
2002	VERANO	37,1	2010	VERANO	31,21
	OTOÑO	18,48		OTOÑO	18,55
	INVIERNO	62,42		INVIERNO	56,3
	PRIMAVERA	68,03		PRIMAVERA	69,69
2003	VERANO	35,16	2011	VERANO	20,42
	OTOÑO	21,07		OTOÑO	7,59
	INVIERNO	49,44		INVIERNO	16,6
	PRIMAVERA	79,76		PRIMAVERA	54,62
2004	VERANO	32,47	2012	VERANO	23,27
	OTOÑO	27,43		OTOÑO	9,66
	INVIERNO	78,69		INVIERNO	20,7
	PRIMAVERA	72,77		PRIMAVERA	36,76
2005	VERANO	38,17	2013	VERANO	22,09
	OTOÑO	27,75		OTOÑO	3,88
	INVIERNO	74,54		INVIERNO	51,11
	PRIMAVERA	66,92		PRIMAVERA	60,28
2006	VERANO	41,91	2014	VERANO	19,37
	OTOÑO	34,31		OTOÑO	7,09
	INVIERNO	71,25		INVIERNO	39,22
	PRIMAVERA	72,35		PRIMAVERA	57,22
2007	VERANO	44,84			
	OTOÑO	19,62			
	INVIERNO	72,15			
	PRIMAVERA	71,52			

Figura 4.5 Evolución temporal de tendencia negativa de la cobertura vegetal tipo D (bosque caduco seco) en km<sup>2</sup> según estaciones del año en el periodo 2000-2014.

$$y = -0,3892x + 56,985$$



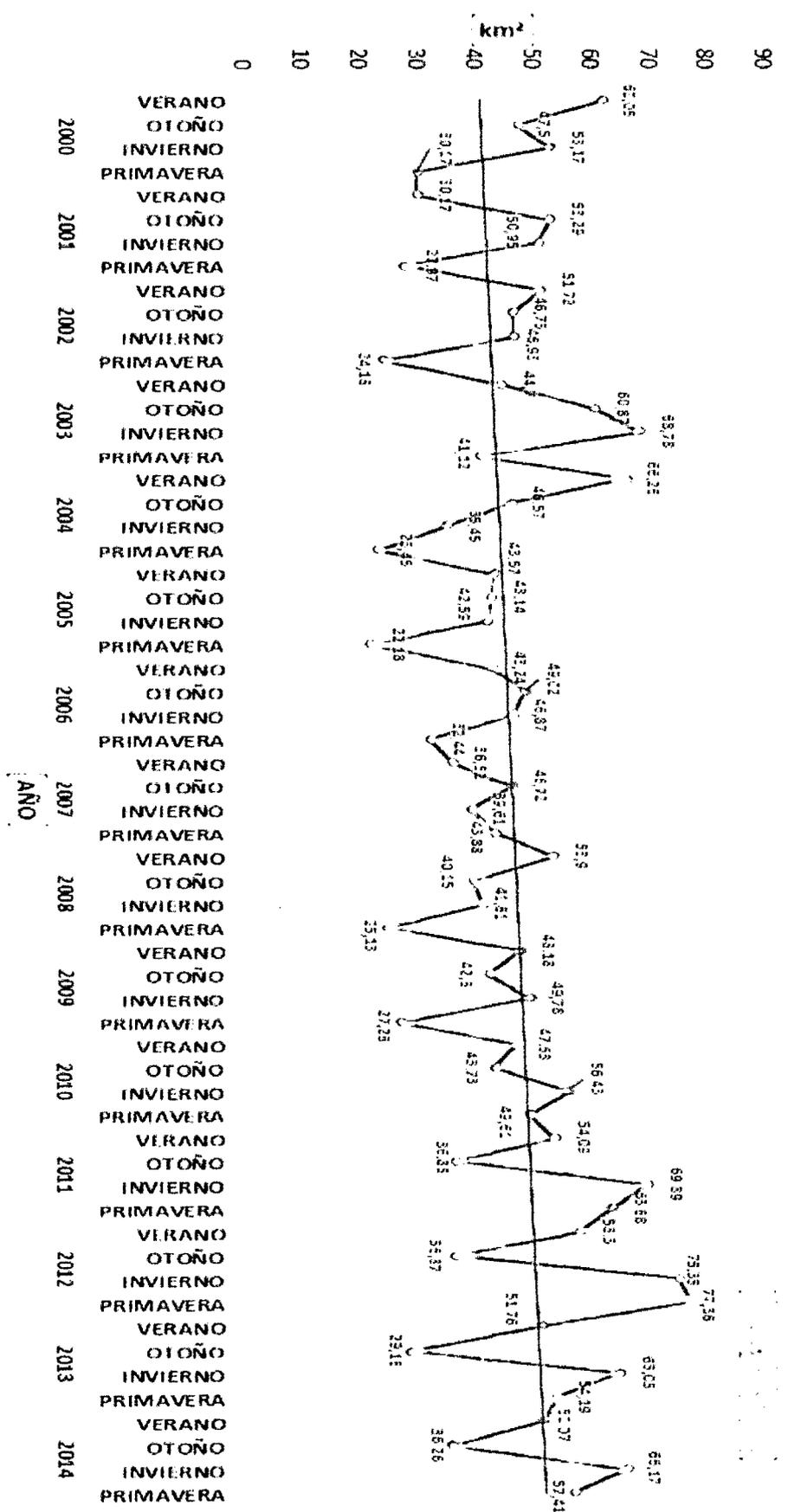
### Vegetación tipo E (NDVI 0,260-0,319)

En la tabla 4.6 y figura 4.6 muestran la información estadística sobre este tipo de cobertura vegetal donde se tuvo un comportamiento positivo de acuerdo al plan de desarrollo sostenible presentado por la municipalidad de Tambillo y las diferentes instituciones que mejoraron la vegetación, las cuales causaron directa e indirectamente el impacto positivo del uso del suelo del distrito. Se observa un área de vegetación menor en primavera del 2005 de 22,18 km<sup>2</sup> y el mayor en primavera del 2012 de 77,36 km<sup>2</sup>, como resultado se observa una pendiente positiva del 2000 al 2014.

Tabla 4.6 Datos del área de vegetación tipo E por estaciones del año, 2000-2014

AÑO	ESTACIÓN	ÁREA(km <sup>2</sup> )	AÑO	ESTACIÓN	ÁREA(km <sup>2</sup> )
<b>2000</b>	VERANO	62,05	<b>2008</b>	VERANO	53,9
	OTOÑO	47,5		OTOÑO	40,15
	INVIERNO	53,17		INVIERNO	41,81
	PRIMAVERA	30,17		PRIMAVERA	25,13
<b>2001</b>	VERANO	30,17	<b>2009</b>	VERANO	48,18
	OTOÑO	53,29		OTOÑO	42,8
	INVIERNO	50,95		INVIERNO	49,78
	PRIMAVERA	27,97		PRIMAVERA	27,28
<b>2002</b>	VERANO	51,72	<b>2010</b>	VERANO	47,53
	OTOÑO	46,73		OTOÑO	43,73
	INVIERNO	46,93		INVIERNO	56,43
	PRIMAVERA	24,18		PRIMAVERA	49,61
<b>2003</b>	VERANO	44,7	<b>2011</b>	VERANO	54,09
	OTOÑO	60,87		OTOÑO	36,88
	INVIERNO	68,78		INVIERNO	69,89
	PRIMAVERA	41,12		PRIMAVERA	63,88
<b>2004</b>	VERANO	66,26	<b>2012</b>	VERANO	58,3
	OTOÑO	46,57		OTOÑO	36,87
	INVIERNO	35,45		INVIERNO	75,35
	PRIMAVERA	23,45		PRIMAVERA	77,36
<b>2005</b>	VERANO	43,57	<b>2013</b>	VERANO	51,76
	OTOÑO	43,14		OTOÑO	29,18
	INVIERNO	42,59		INVIERNO	65,05
	PRIMAVERA	22,18		PRIMAVERA	54,19
<b>2006</b>	VERANO	43,24	<b>2014</b>	VERANO	52,07
	OTOÑO	49,02		OTOÑO	36,26
	INVIERNO	46,87		INVIERNO	66,17
	PRIMAVERA	32,44		PRIMAVERA	57,41
<b>2007</b>	VERANO	36,52			
	OTOÑO	46,72			
	INVIERNO	39,61			
	PRIMAVERA	43,88			

Figura 4.6 Evolución temporal de tendencia positiva de la cobertura vegetal tipo E (montaña degradada de bosque caduco bajo) en km<sup>2</sup> según estaciones del año en el periodo 2000-2014



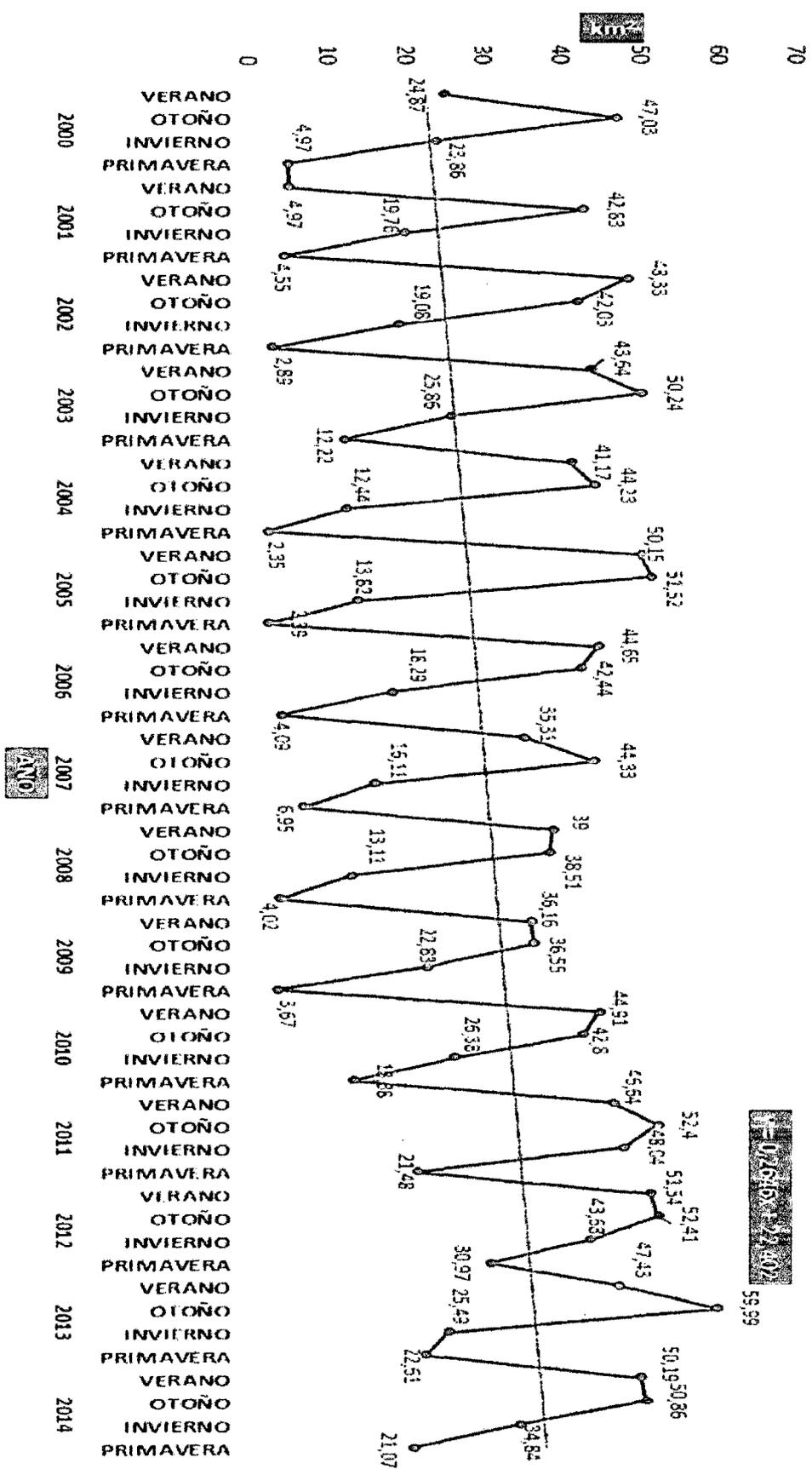
### Vegetación tipo F (NDVI 0,320-0,379)

En la tabla 4.7 y figura 4.7 muestran la información estadística de tendencia lineal positiva. En la estación de otoño del 2013 se tiene una mayor cobertura vegetal de suelos agrícolas de 59,99 km<sup>2</sup> y una menor cobertura vegetal de 2,35 km<sup>2</sup> en primavera del 2004. Este resultado de la evolución del comportamiento fenológico de dicha zona investigada afirma que aumento positivamente los suelos agrícolas.

Tabla 4.7 Datos del área de vegetación tipo F por estaciones del año, 2000-2014

AÑO	ESTACIÓN	ÁREA(km <sup>2</sup> )	AÑO	ESTACIÓN	ÁREA(km <sup>2</sup> )
2000	VERANO	24,87	2008	VERANO	39
	OTOÑO	47,03		OTOÑO	38,51
	INVIERNO	23,86		INVIERNO	13,11
	PRIMAVERA	4,97		PRIMAVERA	4,02
2001	VERANO	4,97	2009	VERANO	36,16
	OTOÑO	42,83		OTOÑO	36,55
	INVIERNO	19,76		INVIERNO	22,83
	PRIMAVERA	4,55		PRIMAVERA	3,67
2002	VERANO	48,33	2010	VERANO	44,91
	OTOÑO	42,03		OTOÑO	42,8
	INVIERNO	19,08		INVIERNO	26,38
	PRIMAVERA	2,89		PRIMAVERA	13,38
2003	VERANO	43,64	2011	VERANO	46,64
	OTOÑO	50,24		OTOÑO	52,4
	INVIERNO	25,86		INVIERNO	48,04
	PRIMAVERA	12,22		PRIMAVERA	21,48
2004	VERANO	41,17	2012	VERANO	51,54
	OTOÑO	44,23		OTOÑO	52,41
	INVIERNO	12,44		INVIERNO	43,68
	PRIMAVERA	2,35		PRIMAVERA	30,97
2005	VERANO	50,15	2013	VERANO	47,43
	OTOÑO	51,52		OTOÑO	59,99
	INVIERNO	13,82		INVIERNO	25,49
	PRIMAVERA	2,39		PRIMAVERA	22,61
2006	VERANO	44,65	2014	VERANO	50,19
	OTOÑO	42,44		OTOÑO	50,86
	INVIERNO	18,29		INVIERNO	34,84
	PRIMAVERA	4,09		PRIMAVERA	21,07
2007	VERANO	35,31			
	OTOÑO	44,33			
	INVIERNO	16,11			
	PRIMAVERA	6,95			

Figura 4.7 Evolución temporal de tendencia positiva de la cobertura vegetal tipo F (suelo agrícola) en km<sup>2</sup> según estaciones del año, en el periodo 2000-2014



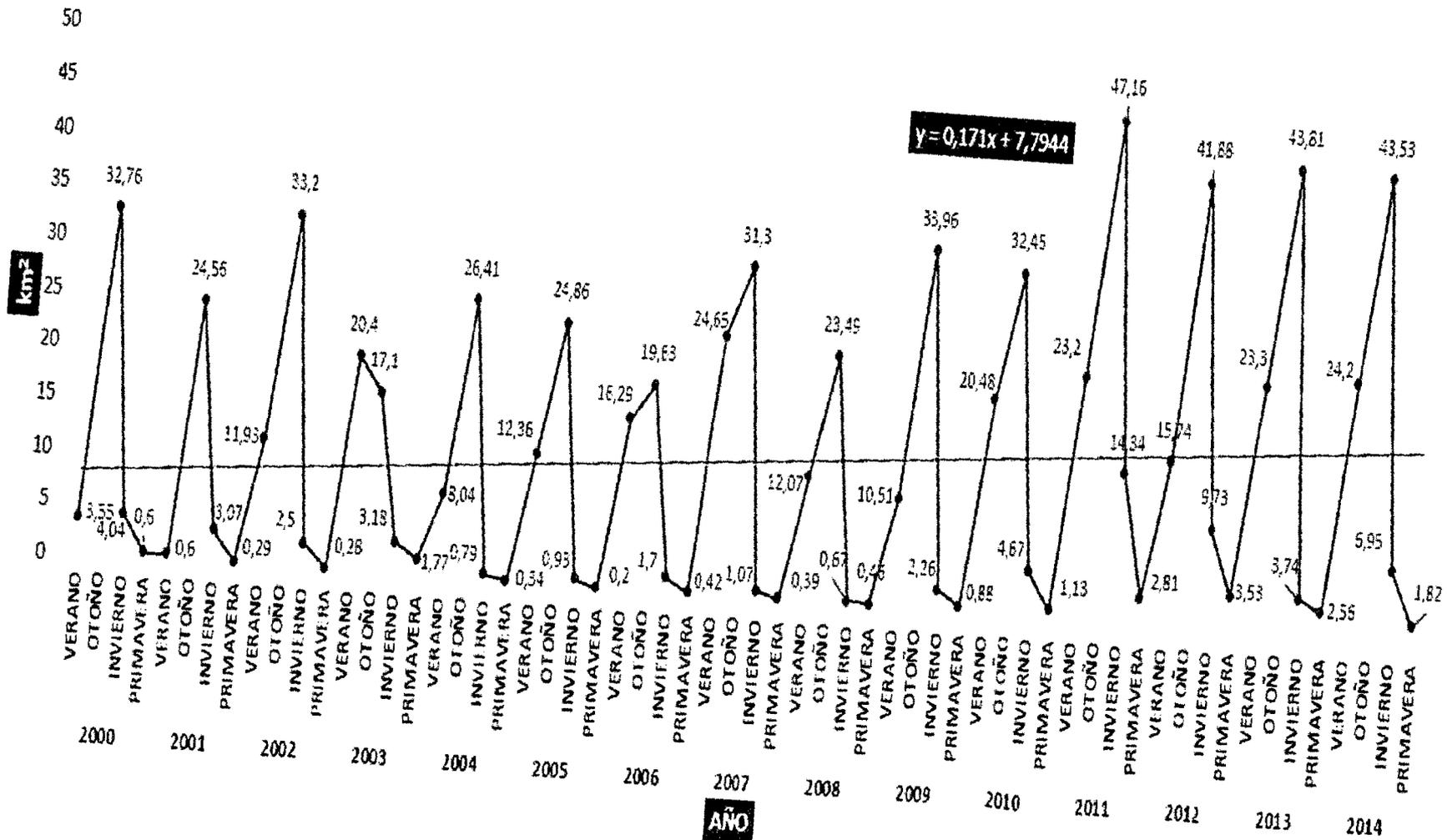
### Vegetación tipo G (NDVI 0,380-0,439)

En la tabla 4.8 y figura 4.8 muestran la información estadística donde la línea de tendencia es positiva. Pues la política institucional de la Municipalidad de Tambillo, Gobierno Regional, conjuntamente con otras instituciones de Ayacucho causaron directa e indirectamente el impacto positivo del uso de suelo con bosques de hojas perennes, debido la presencia de los ríos de la microcuenca de Niño Yucaes y Muyurina, y las aguas del proyecto especial del río Cachi con lo cual tienen regadío todo el año mejorando positivamente el aumento de la vegetación en los últimos años. Observando los picos más altos en la estación de otoño representa mayor área de vegetación de bosques de hoja ancha y perenne. (47,16 km<sup>2</sup> el 2011) y una baja vegetación en la estación de primavera.

Tabla 4.8 Datos del área de vegetación tipo G por estaciones del año, 2000-2014

AÑO	ESTACIÓN	ÁREA(km <sup>2</sup> )	AÑO	ESTACIÓN	ÁREA(km <sup>2</sup> )
<b>2000</b>	VERANO	3,55	<b>2008</b>	VERANO	12,07
	OTOÑO	32,76		OTOÑO	23,49
	INVIERNO	4,04		INVIERNO	0,67
	PRIMAVERA	0,6		PRIMAVERA	0,46
<b>2001</b>	VERANO	0,6	<b>2009</b>	VERANO	10,51
	OTOÑO	24,56		OTOÑO	33,96
	INVIERNO	3,07		INVIERNO	2,26
	PRIMAVERA	0,29		PRIMAVERA	0,88
<b>2002</b>	VERANO	11,93	<b>2010</b>	VERANO	20,48
	OTOÑO	33,2		OTOÑO	32,45
	INVIERNO	2,5		INVIERNO	4,67
	PRIMAVERA	0,28		PRIMAVERA	1,13
<b>2003</b>	VERANO	20,4	<b>2011</b>	VERANO	23,2
	OTOÑO	17,1		OTOÑO	47,16
	INVIERNO	3,18		INVIERNO	14,34
	PRIMAVERA	1,77		PRIMAVERA	2,81
<b>2004</b>	VERANO	8,04	<b>2012</b>	VERANO	15,74
	OTOÑO	26,41		OTOÑO	41,88
	INVIERNO	0,79		INVIERNO	9,73
	PRIMAVERA	0,34		PRIMAVERA	3,53
<b>2005</b>	VERANO	12,36	<b>2013</b>	VERANO	23,3
	OTOÑO	24,86		OTOÑO	43,81
	INVIERNO	0,93		INVIERNO	3,74
	PRIMAVERA	0,2		PRIMAVERA	2,56
<b>2006</b>	VERANO	16,29	<b>2014</b>	VERANO	24,2
	OTOÑO	19,63		OTOÑO	43,53
	INVIERNO	1,7		INVIERNO	6,95
	PRIMAVERA	0,42		PRIMAVERA	1,82
<b>2007</b>	VERANO	24,65			
	OTOÑO	31,3			
	INVIERNO	1,07			
	PRIMAVERA	0,39			

Figura 4.8 Evolución temporal de tendencia positiva de la cobertura vegetal tipo G (bosque de hoja ancha y perenne) en km<sup>2</sup> según estaciones del año, en el periodo 2000-2014



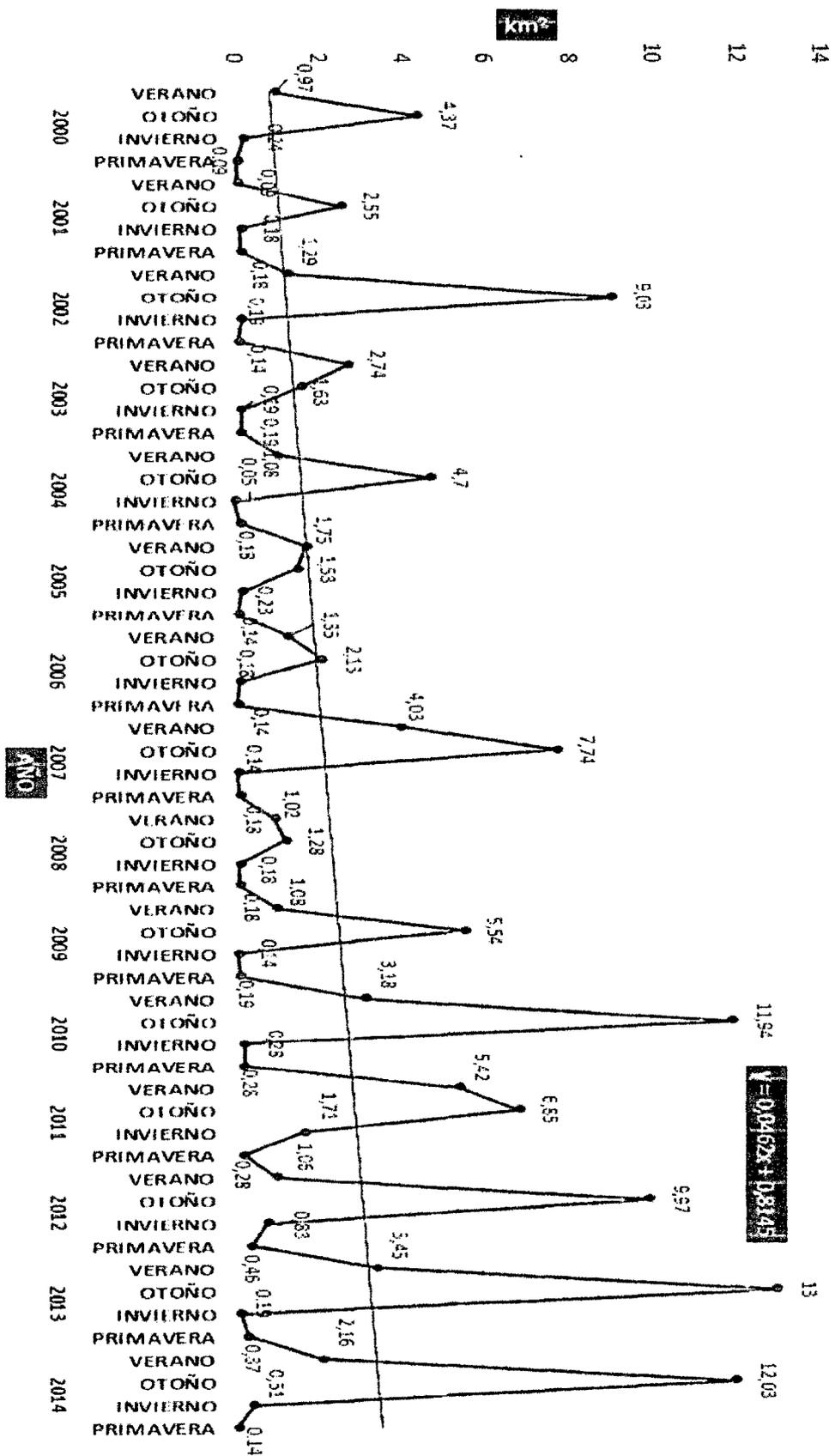
### Vegetación tipo H (NDVI 0,440-0,499)

De la tabla 4.9 y figura 4.9 muestra una pendiente de tendencia positiva teniendo como máxima cobertura vegetal de prado andino con bosques de hoja perenne en la estación de otoño de 2013 con 13 km<sup>2</sup> y un mínimo en la estación de invierno con 0,19 km<sup>2</sup>.

Tabla 4.9 Datos del área de vegetación tipo H por estaciones del año, 2000-2014

AÑO	ESTACIÓN	ÁREA(km <sup>2</sup> )	AÑO	ESTACIÓN	ÁREA(km <sup>2</sup> )
<b>2000</b>	VERANO	0,97	<b>2008</b>	VERANO	1,02
	OTOÑO	4,37		OTOÑO	1,28
	INVIERNO	0,24		INVIERNO	0,18
	PRIMAVERA	0,09		PRIMAVERA	0,18
<b>2001</b>	VERANO	0,09	<b>2009</b>	VERANO	1,08
	OTOÑO	2,55		OTOÑO	5,54
	INVIERNO	0,18		INVIERNO	0,14
	PRIMAVERA	0,18		PRIMAVERA	0,19
<b>2002</b>	VERANO	1,29	<b>2010</b>	VERANO	3,18
	OTOÑO	9,03		OTOÑO	11,94
	INVIERNO	0,19		INVIERNO	0,28
	PRIMAVERA	0,14		PRIMAVERA	0,28
<b>2003</b>	VERANO	2,74	<b>2011</b>	VERANO	5,42
	OTOÑO	1,63		OTOÑO	6,85
	INVIERNO	0,19		INVIERNO	1,71
	PRIMAVERA	0,19		PRIMAVERA	0,28
<b>2004</b>	VERANO	1,08	<b>2012</b>	VERANO	1,06
	OTOÑO	4,7		OTOÑO	9,97
	INVIERNO	0,05		INVIERNO	0,83
	PRIMAVERA	0,18		PRIMAVERA	0,46
<b>2005</b>	VERANO	1,75	<b>2013</b>	VERANO	3,45
	OTOÑO	1,53		OTOÑO	13
	INVIERNO	0,23		INVIERNO	0,19
	PRIMAVERA	0,14		PRIMAVERA	0,37
<b>2006</b>	VERANO	1,35	<b>2014</b>	VERANO	2,16
	OTOÑO	2,13		OTOÑO	12,03
	INVIERNO	0,18		INVIERNO	0,51
	PRIMAVERA	0,14		PRIMAVERA	0,14
<b>2007</b>	VERANO	4,03			
	OTOÑO	7,74			
	INVIERNO	0,14			
	PRIMAVERA	0,18			

Figura 4.9 Evolución temporal de tendencia positiva de la cobertura vegetal tipo H (prado andino con bosque de hoja perenne) en km<sup>2</sup> según estaciones del año, en el periodo 2000-2014



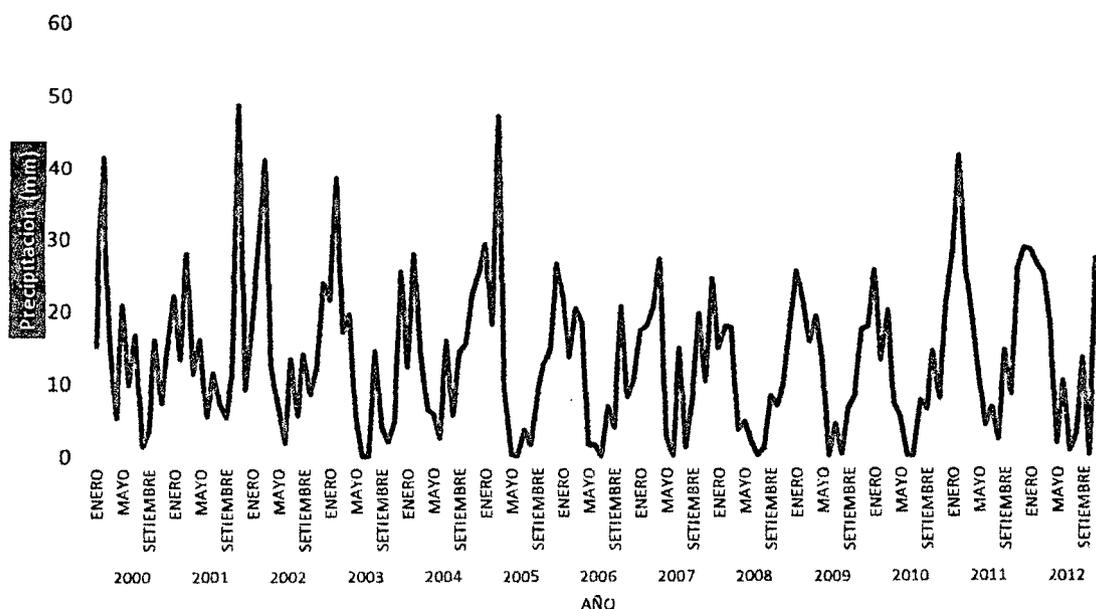
#### 4.4 VALIDACIÓN DE RESULTADOS DEL NDVI CON DATOS DE LA ESTACIÓN METEOROLÓGICA DE TAMBILLO

Los cambios producidos diariamente en la temperatura y precipitación atmosférica pueden beneficiar o perjudicar algunos tipos de cultivos según el uso de suelo. Los cambios en la temperatura pueden afectar positiva o negativamente la producción (aumentar o disminuir el rendimiento de las parcelas) y eventualmente, posibilitar la aparición de plagas, enfermedades y, en algunos casos, pérdida de cosechas.

Con la finalidad de tener un mejor conocimiento de las variaciones térmicas anuales, fue necesario contar con mayor información de la temperatura y precipitación atmosférica de la estación meteorológica del distrito de Tambillo.

- **Serie temporal de la precipitación y temperatura atmosférica con datos registrados en la estación meteorológica de Tambillo.**

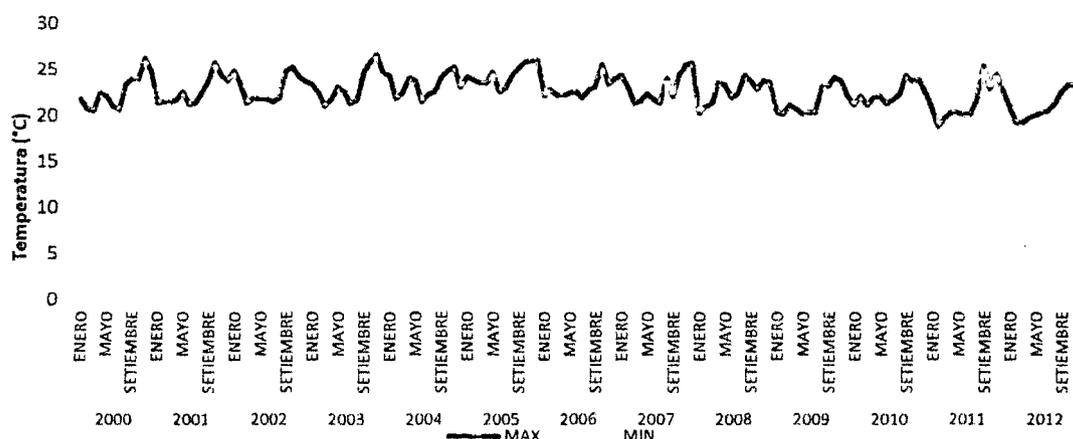
La figura 4.10 muestra la información estadística descriptiva sobre las precipitaciones atmosféricas máximas, donde los meses de noviembre, diciembre, enero y febrero registraron mayor precipitación según la estación meteorológica del distrito de Tambillo (ver anexo 02).



**Figura 4.10** Precipitación atmosférica máxima

Fuente: estación meteorológica de Tambillo

La figura 4.11 muestra la información estadística descriptiva de las temperaturas atmosféricas máximas y mínimas registradas por la estación meteorológica de Tambillo. (ver anexo 02)

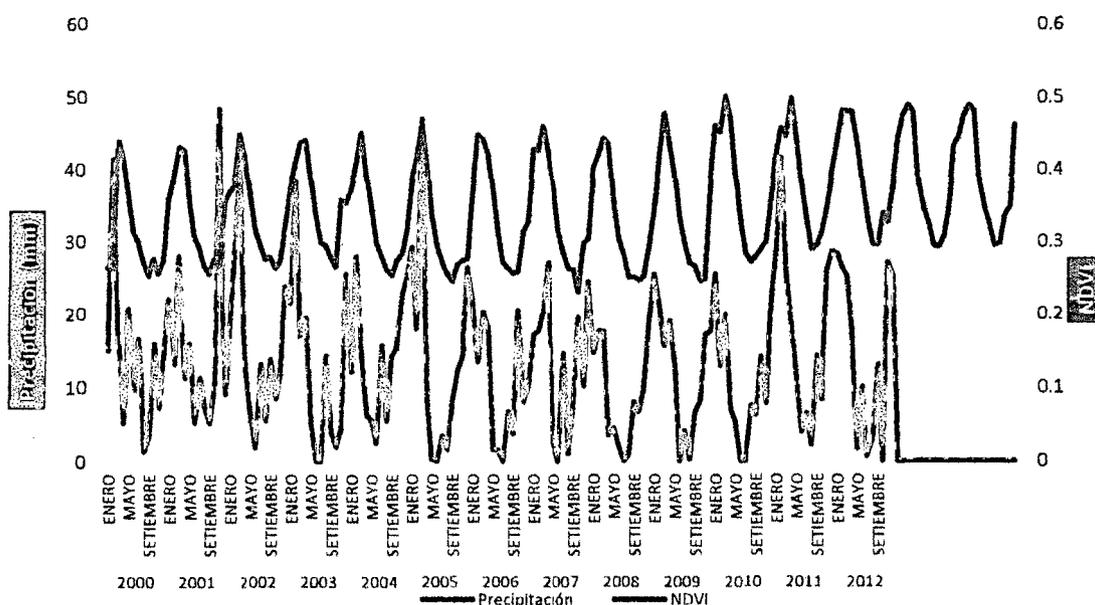


**Figura 4.11** Temperatura atmosférica máxima y mínima

Fuente: Estación meteorológica de Tambillo

#### 4.5 VALIDACIÓN DE DATOS DE IMÁGENES SATELITALES SEGÚN NDVI Y PRECIPITACIÓN ATMOSFÉRICA

La figura 4.12 muestra la relación estadística descriptiva en series de tiempo del NDVI y la precipitación atmosférica máxima, donde se observa una máxima precipitación atmosférica promedio entre diciembre, enero y febrero (intensas lluvias), en los meses de marzo abril y mayo observamos suelos agrícolas con una máxima cobertura vegetal.



**Figura 4.12** Relación entre NDVI y precipitación atmosférica

Fuente: Tabla 4.1 y anexo 02

#### 4.6 VALIDACIÓN DE DATOS DE IMÁGENES SATELITALES SEGÚN NDVI Y TEMPERATURA ATMOSFÉRICA

La figura 4.13 muestra la relación estadística descriptiva en series de tiempo sobre el NDVI y la temperatura atmosférica máxima. Observamos que al tener una máxima temperatura atmosférica en promedio entre los meses de agosto, setiembre, octubre y noviembre, se tiene un mínimo de NDVI en estos mismos meses. Un aumento de la temperatura atmosférica hace que disminuya áreas de los suelos agrícolas.

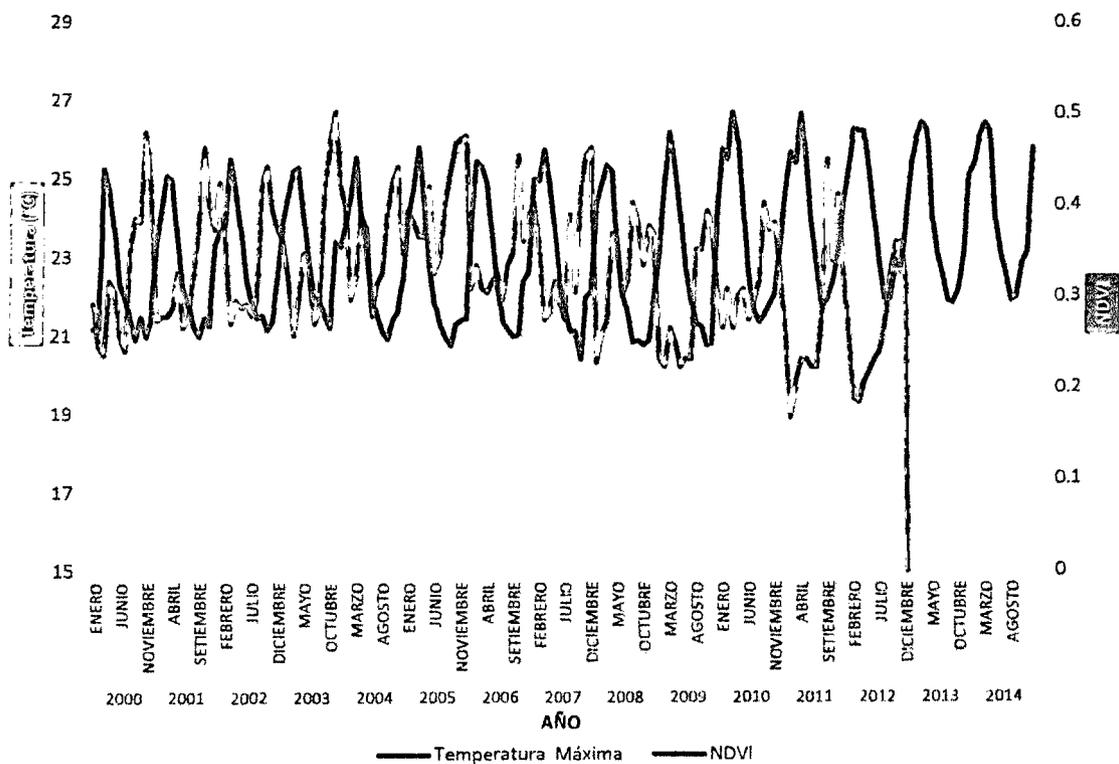


Figura 4.13 Relación entre NDVI y la temperatura atmosférica

Fuente: Tabla 4.1 y anexo 02

## CAPÍTULO V

### DISCUSIÓN DE RESULTADOS

1. En la tabla 4.1 y figura 4.1 se muestran los valores del NDVI por meses del año donde se observa una tendencia de crecimiento positivo llegando a un NDVI de valor más alto de 0,50119476 en el mes de marzo del 2010 y mínimo de 0,2297752 en el mes de octubre del 2007. Teniendo en cuenta que se utilizó la ecuación 2.20 y el promedio del NDVI de dos imágenes al mes. Los meses que no hay lluvias, el NDVI es menor (escasa vegetación mes de octubre) y meses después de las lluvias el NDVI es mayor (incremento de la vegetación mes de marzo).

2. En la tabla 4.2 y figura 4.2 observamos los valores porcentuales del Índice de Vegetación de Diferencia Normalizada (NDVI), donde en la estación de verano se han incrementado significativamente de 26,75% el año 2000 a 46,09% en el año 2014. El valor del NDVI en la estación de otoño del 2000 con 40,74%, el 2001 con 40,61% y 42,19% el 2003. Alcanzando un mínimo de 39,56% el 2004, y un máximo de 46,56% el año 2012, luego de ello descendiendo ligeramente a 45,15% el 2013 y 2014. En Invierno del 2000 al 2014 fluctuó entre 29,53% y 32,14% teniendo un valor mínimo el año 2005 con 27,21% y como máximo el 2011 con 46,28%. En la estación de primavera el NDVI mínimo se dio el año 2008 con 25,01%, luego el 2000 con 26,18% llegando a un máximo de 32,76% el 2014.

3. En las tablas y figuras 4.3 al 4.9 nos brindan una información acerca de la hipótesis planteada y los objetivos alcanzados donde se determinó que en la estación de verano, (época de lluvias), la cobertura vegetal tipo D: bosque caduco seco según el NDVI 0,200 – 0,259, hubo un área de mayor extensión de 79,49 km<sup>2</sup> en el 2009, disminuyendo progresivamente el 2013 a 22,08 km<sup>2</sup>. Contrariamente la cobertura vegetal tipo F: suelo agrícola según el NDVI 0,320- 0,379, tuvo un área de extensión menor de 24,87 km<sup>2</sup> en el 2008, incrementándose significativamente el 2012 a 51,54 km<sup>2</sup>, teniendo una ligera disminución el 2014 a 50,19 km<sup>2</sup>. Esto nos indica que del 2000 al 2014 las áreas donde había escasa vegetación se comenzaron a incrementar significativamente.

4. En las tablas y figuras 4.3 al 4.9 nos indican que, en la estación de otoño (época de gran vegetación), la cobertura vegetal tipo E: montaña degradada de bosque caduco bajo con arbustos caducos seco según el NDVI 0,260 – 0,319, hubo un área de extensión de 53,17 km<sup>2</sup> en el 2000, disminuyendo progresivamente el 2014 a 36,26 km<sup>2</sup>. Contrariamente la cobertura vegetal tipo F: suelo agrícola según el NDVI 0,320- 0,379

hubo un área de extensión de 47,03 km<sup>2</sup> en el 2000, incrementándose significativamente el 2014 a 50,86 km<sup>2</sup>. Otros tipos de vegetación también tiene una ligera variabilidad similar. Con este resultado se confirmó que del 2000 al 2014 las áreas donde había un bosque seco ralo de superficies disecadas se comenzaron a incrementar la vegetación significativamente.

5. En las tablas y figuras 4.3 al 4.9 observamos que en la estación de invierno (época de escasas de lluvias), la cobertura vegetal tipo E: montaña degradada de bosque caduco bajo con arbustos caducos seco según el NDVI 0,260 – 0,319, hubo un área de mayor extensión de 53,17 km<sup>2</sup> en el 2000, disminuyendo progresivamente al 2004 a 35,45 km<sup>2</sup>, observándose un incremento a 66,17 km<sup>2</sup> el 2014. Contrariamente la cobertura vegetal tipo F: suelo agrícola según el NDVI 0,320- 0,379, hubo un área de extensión menor de 23,86 km<sup>2</sup> en el 2000, observándose una variabilidad en los años siguientes para luego incrementarse significativamente el 2014 a 34,84 km<sup>2</sup>. Otros tipos de vegetación también tienen una ligera variabilidad similar, como es el tipo H: prado andino con bosque de hoja perenne, según el NDVI 0,440 – 0,499, donde se observa un área de extensión menor de 0,24 km<sup>2</sup> en el 2000 y una variabilidad en los años siguientes para luego incrementarse significativamente el 2014 a un máximo de 0,51 km<sup>2</sup>. Esto nos indica que del 2008 al 2013 las áreas de vegetación varían en esta estación del año pero manteniendo a incrementar la vegetación de suelo agrícola y bosque de hoja ancha y perenne a las riveras del río Niño Yucaes.

6. En las tablas y figuras 4.3 al 4.9 se observan que en la estación de primavera (época seca), la cobertura vegetal tipo D: bosque caduco seco estacional tropical según el NDVI 0,200 – 0,259, hubo un área de mayor extensión de 65,38 km<sup>2</sup> en el 2000, disminuyendo progresivamente al 2014 a 57,22 km<sup>2</sup>. Contrariamente la cobertura vegetal tipo F: suelo agrícola según el NDVI 0,320- 0,379 hubo un área de extensión menor de 4,97 km<sup>2</sup> en el 2000, incrementarse significativamente el 2014 a 21,09 km<sup>2</sup>. Otros tipos de vegetación también tienen una ligera variabilidad similar, como es el tipo E: montaña degradada de bosques caduco bajo con arbustos caducos, según el NDVI 0,260 – 0,319 donde se observa un área de extensión mediana de 30,17 km<sup>2</sup> en el 2000 y una variabilidad en los años siguientes para luego incrementarse significativamente el 2012 a un máximo de 77,35 km<sup>2</sup>, teniendo un descenso al 2014 de 57,41 km<sup>2</sup>. Esto nos indica que del 2000 al 2012, las áreas de vegetación en esta estación del año varían, porque en dicha zona de estudio empiezan la época de cosecha pero manteniéndose un incrementar ligero la vegetación de suelo agrícola y bosque de hoja ancha y perenne a las riveras del río Niño Yucaes.

7. La validación del NDVI con respecto a la precipitación que se muestra en la a figura 4.12 muestra la relación estadística en series de tiempo sobre las precipitaciones máximas y el NDVI, como resultado se observa que al tener una máxima precipitación promedio entre diciembre, enero y febrero (intensas lluvias), en el mes de marzo abril y mayo observamos suelos agrícolas con una máxima cobertura vegetal. Así mismo la figura 4.13 muestra la relación estadística en series de tiempo sobre la temperatura máximas y el NDVI. Observamos que al tener una mayor temperatura en promedio entre los meses de agosto, setiembre, octubre y noviembre, se tiene un valor menor de NDVI en estos mismos meses. La consecuencia del aumento de la temperatura del aire hace que disminuya el área de los suelos agrícolas.

Los estudios de los mapas temáticos de la Zonificación Ecológica y Económica (ZEE - 2012) publicados por el Gobierno Regional de Ayacucho sustentan dichos resultados.

## CONCLUSIONES

1. Se logró describir el comportamiento del Índice de Vegetación de Diferencia Normalizada con las 341 imágenes (MOD13Q1) según estaciones del año en km<sup>2</sup> y tipos de cobertura vegetal de suelos en series de tiempo, como muestra los resultados de las Tablas y Figuras 4.1 al 4.9, alcanzando así uno de los objetivos específicos propuestos.
2. Las Figuras 4.10 y 4.11 nos permitió estimar y validar los resultados obtenidos del Índice de Vegetación de Diferencia Normalizada y datos de precipitación y temperatura atmosférica de la estación meteorológica de Tambillo, en el periodo 2000-2014. Teniendo como resultado las Figuras 4.12 y 4.13, obteniendo así el objetivo específico propuesto.
3. Se logró evaluar el impacto de uso de suelos según el Índice de Vegetación de Diferencia Normalizada en series de tiempo, durante el periodo 2000 al 2014 con información generada por las imágenes satelitales MODIS Terra del distrito de Tambillo, como muestra la Tabla 4.1 y Figura 4.1, logrando así el objetivo general planteado.
4. Se determinó un aumento en las áreas de cobertura vegetal, lo que causó una disminución en áreas de zonas de suelo desnudo, lo cual es satisfactorio debido a que indica la mejora en el comportamiento fenológico de la vegetación en el distrito de Tambillo como resultado de las actividades propuestas en el plan anual de manejo de áreas de cultivo por las entidades pertenecientes al Gobierno Regional de Ayacucho (irrigación por aguas del proyecto especial río Cachi), negando así la hipótesis nula planteada y aceptándose la hipótesis alterna, tales resultados se muestran en las Figuras 4.6 al 4.9.

## RECOMENDACIONES

1. Ante los diversos índices de vegetación existentes. La mayoría de los trabajos de investigación mediante la técnica de teledetección utilizan NDVI, por lo que sugiero atenerse a lo que la gente conoce y confía. Además el NDVI es simple, cuenta con el mejor rango dinámico (-1 a +1) que cualquiera de los índices y tiene la mejor sensibilidad a los cambios en la cubierta vegetal. Es moderadamente sensible a un segundo plano de suelo y la atmósfera, excepto en la baja cubierta o densidad vegetal.
2. Continuar con estudios de evaluación ambiental utilizando la técnica de teledetección por ser una forma óptima de detectar de forma preliminar posibles variaciones en el vigor de la vegetación y cambios de uso de suelo, además ofrece ventajas únicas frente a otros medios de observación de la Tierra como es el trabajo de campo. Los datos de satélite no sustituye a las observaciones "in situ" sino que las complementan para la calibración de los datos como para la comprobación y validación final de la información obtenida.
3. Promover programas a través de las instituciones del estado, el control y monitoreo de la vegetación para evaluar la ampliación de áreas verdes en algunos sectores críticos de las microcuencas y laderas del distrito, con una forestación y reforestación, en aras de seguir superando los 0,8 m<sup>2</sup>/ hab recomendados por la Organización Mundial de la Salud (OMS).
4. Promover más trabajos de investigación que estén dirigidos a la reducción y erradicación del hambre y pobreza en nuestra región de Ayacucho, que cuenta con un permanente estrés hídrico (déficit de lluvias) y alta pobreza de suelos debido a que viene ocurriendo una serie de variaciones en el comportamiento dinámico espacio-temporal de la vegetación, como fuente natural de recursos agrícolas y pecuarios, influenciado por el incremento de la población, derivándose ello en un aumento en la demanda de alimentos y reducción de las áreas rurales.

## REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS

**[1]** CARVACHO BART, L. y SÁNCHEZ MARTÍNEZ, M. Comparación de índices de vegetación a partir de imágenes MODIS en la región del Libertador Bernardo O'Higgins, Chile; en el período 2001-2005. En: Ojeda, J., Pita, M.F. y Vallejo, I. (Eds.) *Tecnologías de la Información Geográfica: La Información Geográfica al servicio de los ciudadanos*. Secretariado de Publicaciones de la Universidad de Sevilla; 2010. ISBN 978-84-472-1294-1:728-737.

**[2]** FUMING WANG; JINGFENG HUANG y LA CHEN. Development of a vegetation index for estimation of leaf area index based on simulation modeling. *Journal of Plant Nutrition*; 08 enero 2010, vol. 33. N° 3 p. 328-338.

**[3]** SANCHA NAVARRO, E.F. El estudio de los índices de vegetación como base para conocer las relaciones entre la vegetación y el clima. *Publicaciones de la Universidad de Sevilla*. (Sevilla); 2010. ISBN: 978-84-472-1294-1:95-108.

**[4]** RABAGLIO, M. Impacto del uso del suelo sobre el Índice de Vegetación Normalizado. [Tesis pre grado]. La Plata: Universidad de Buenos Aires; 7 junio 2012.

**[5]** MATTAR C., SOBRINO J. A., WIGNERON. J. P., JIMÉNEZ-MUÑOZ J. C y KERR. Y. Estimación de la humedad del suelo a partir de índices de vegetación y microondas pasivas. *Revista de Teledetección. Asociación Española de Teledetección*; 2011. vol.36. ISSN: 1988-8740, 62-72.

**[6]** ABAURREA PEREDA, M. Comparación de índices de vegetación en zona semiárida de Navarra [Tesis pre grado]. España, Universidad Pública de Navarra; setiembre 2013.

**[7]** GONZALES AGUILAR. C. Aplicación del Índice de Vegetación Derivados de la Imagen. [Tesis de maestría]. Ecuador. Universidad Nacional de la Plata; 08 abril 2014.

**[8]** ALBURQUEQUE. S y ROJAS. A. Estimación de la Temperatura Superficial del Mar Peruano Usando Imágenes AVHRR y MODIS en el Infrarrojo Térmico-2008. Dirigido por Universidad Nacional Mayor de San Marcos, Facultad de Ciencias Físicas, Lima-Perú.

Trabajo ha sido financiado por la UNMSM en el año 2009 y por programa. INCAGRO del Ministerio de Agricultura en los años 2007-2009; 2010.

**[9]** QUEZADA. G y ROJAS. A. Modelo físico de la estimación de la concentración de clorofila-a en el mar peruano usando imágenes MODIS. Revista de Investigación de Física. Universidad Nacional Mayor de San Marcos, Facultad de Ciencias Físicas, Lima-Perú; 28 diciembre 2011, vol. 4, 111402403.

**[10]** MONCADA, W. MASÍAS, M. ALDANA, C. PAIVA, D. Mapeo de nubosidades en la región Ayacucho mediante sistema satelital, 2000 al 2010. En: Revista de Investigación de la Universidad Nacional San Cristóbal de Huamanga; 2011.

**[11]** SOLANO. R y ROJAS. A. Evaluación de la vegetación y del estado de suelos de la Región Ayacucho mediante datos satelitales, periodo 2000 – 2012”, dirigido por la Universidad Nacional San Cristóbal de Huamanga, Ayacucho. Financiamiento: Fondo de Desarrollo Socioeconómico del Proyecto Camisea (FOCAM); 2013.

**[12]** MONCADA W. JIMENEZ J. PEREDA A. ALDANA C. Cuantificación hidrográfica de la cuenca del Rio Cachi Ayacucho, mediante imágenes satelitales Revista de Investigación de la Universidad Nacional San Cristóbal de Huamanga; 2014.

**[13]** CHUVIECO, E y HUETE, A. Fundamentals of Satellite Remote Sensing. [Libro]. New York, 2010: Taylor y Fransis group, [27/04/2016].

Disponible en: <https://www.crcpress.com/Fundamentals-of-Satellite>.

**[14]** RODRIGUEZ, P., SANCHEZ, C. y DOMINGUEZ, G. Cuestiones de Teledetección, edición digital. Universidad Nacional de educación a distancia. [Libro]. Madrid, España, 2015: UNED, [12/09/2015].

Disponible en: ISBN electrónico: 978-84-362-7067-9 edición digital.

**[15]** MARTÍN EDROSA, R Aplicación de la teledetección para el monitoreo de eventos hídricos superficiales mediante imágenes cosmo sky med. [Tesis de maestría] Córdoba, Argentina. Universidad Nacional de Córdoba. Julio 2011.

**[16]** ARBELO MANUEL. Teledetección, tutorial. [Texto tutorial]. Universidad de La Laguna España. Editorial John Willey & Sons. [27/04/2016].

Disponible en: <https://marbelo.webs.ull.es/rs.html>.

[17] FRANCOIS, J; TZITZIKI, J. LOPEZ, G; COLDITZ. Aplicaciones del Sensor MODIS para el Monitoreo del Territorio. Secretaría de Medio Ambiente y Recursos Naturales. Primera edición. Universidad Nacional Autónoma de México, Printed; 2011.

[18] LOPEZ GARCIA, B. Estudio comparativo de índices espectrales aplicados a los incendios del Alt Empordá de 2000 y 2012 a través de imágenes MODIS [Tesis ingeniería técnica topográfica]. Universidad Politécnica de Catalunya. Enero/febrero 2013.

[19] COLDITZ, R.R. Time series generation and classification of MODIS data for land cover mapping. Dissertation. IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing; octubre 2008, vol. 46, N° 10, 3308.

[20] MUÑOZ AGUAYO, P. Índice de Vegetación Diferencial Normalizado. [Tesis maestría] .Departamento Provincial de Aguas de Argentina. Geógrafo CIREN; 2015. Disponible en: <https://www.agroclimatico.minagri.gob.cl/.../2015/.../Indices-de-vegetación-Pedro-Muñoz>.

[21] TRANSPORTADORA DE GAS DEL PERÚ S.A. Uso actual de la tierra Ayacucho: informe de INRENA en 1999 para PRONAMACHCS: TGP; 13 de enero 2014.

Disponible en:

<http://www.southperupanel.org/files/eias/04.%20EIA%20MODIFICACIONES%20TRANSPORTE%20PRODUCTOS/Volumen%20II%20%20LB%20Amb%20y%20Soc/1.2%20L%C3%ADnea%20Base%20Ayacucho/1.2.7%20Uso%20Actual.doc>.

[22] GOBIERNO REGIONAL DE AYACUCHO. Zonificación Ecológica Económica de la región de Ayacucho. Documento: Memoria Descriptiva de Cobertura Vegetal y Uso Actual-ZEE del departamento Ayacucho-Perú; 2012.

[23] USGS MODIS reprojection tool web interface (MRTWeb), consultado del 25 de agosto de 2013 hasta 27 de abril del 2016. <http://mrtweb.cr.usgs.gov>. 2010.

[24] WATANABE, J. Manejo del ENVI 4,5 [Monografía en internet]. Cajamarca-Perú; 09 de noviembre del 2010.

Disponible en: <http://www.monografias.com/trabajos82/manejo-envi/manejo-envi5.shtml>.

**[25]** FAO. Evaluación de los recursos forestales mundiales 2010. Informe nacional Perú. FRA2010/163 Roma.2010.

Disponible en: [www.fao.org/forestry/20416-076b3fb72d387f4ce89a10d2cc71194d.pdf](http://www.fao.org/forestry/20416-076b3fb72d387f4ce89a10d2cc71194d.pdf).

## **ANEXOS**

## ANEXO 01

CÓDIGOS IDL UTILIZADO EN EL PROCESAMIENTO DE APILADO, CORTE Y PROMEDIO TEMPORAL DE 341 IMÁGENES SATELITALES MODIS-TERRA (MOD13Q1).

### PRO APILADO\_TIF

```
; propósito: apilar las 341 imágenes, que se cortaron en MRTWEB, en
formato .tif
files = FINDFILE ('D:\NDVI_MODIS_250\imagenes_modis_2014\*.tif',
count=count)
; direccionar a la carpeta donde están los archivos cortados
fid =lonarr(count); la función lonarr devuelve un array de números
long de puros ceros
pos = lonarr(count)
dims = lonarr(5,count)
out_bname=strarr(count)
ssl=strarr(count)
n=23
for i=0,count-1 DO BEGIN
ssl[i]=STRMID(STRMID(files(i),-1,STRPOS(STRMID(files(i),-
1),'.tif')),n)
endfor
;print, ssl
FOR i=0, count-1 DO BEGIN
envi_open_data_file, files (i), r_fid=layer_fid
ENVI_FILE_QUERY, layer_fid, NS = ns, NL = nl, NB = nb, sname=sname
; sname es el nombre completo de la imagen
fid[i] = layer_fid ;tenemos un conjunto de identificadores
pos[i] = 0 ; el valor cero indica que es solo una banda
dims[0,i] = [-1,0,ns-1,0,nl-1]
Endfor
out_name = 'D:\NDVI_MODIS_250\imagenes_modis_2014\API'+ 'APILADO.tif'
; inicialmente estaba asi: 'E:\Imágenes del SPOT\algo'+ 'APILADO.tif' ;
para las imágenes .tif
out_dt = 2 ; Tipo de salida = doble precisión de punto flotante
out_proj = envi_get_projection(fid=layer_fid, pixel_size=out_ps);
envi_doit, 'envi_layer_stacking_doit', fid=fid, pos=pos, dims=dims, $
out_dt=out_dt, out_name=out_name, $
out_bname = ssl, $
interp=0, out_ps=out_ps, $
out_proj=out_proj, r_fid=r_fid
end.
```

## PRO CORTE\_TIF

```
; propósito: cortar las 341 imágenes con el vector Tambillo.
RawFiles =
FILE_Search('D:\NDVI_MODIS_250\imagenes_modis_2014\2013APILADO.tif');
FileCount = N_ELEMENTS(RawFiles)
IF FileCount EQ 0 THEN RETURN
FOR NX =0,FileCount -1 DO BEGIN
FileName = RawFiles[NX]
envi_open_file, FileName , r_fid=fid
if (fid eq -1) then begin
envi_batch_exit
return
endif
PRINT, 'fid=',fid
ENVI_FILE_QUERY, fid, DIMS=dims, NS=ns, NL=nl, NB=nb, B NAMES= B NAMES
t_fid=LONARR(nb)+fid
pos=LINDGEN(nb)
indexstr = strpos(FileName, '.tif')
out_name = strmid(FileName,0,indexstr) + '_CUT.tif'
evf_file = 'D:\NDVI_MODIS_250\NDVI\TTBLL.evf'
evf_id=ENVI_EVF_OPEN(evf_file)
ENVI_EVF_INFO, evf_id, num_recs=num_recs,data_type=data_type,
projection=projection, layer_name=layer_name
roi_ids = LONARR(num_recs)
FOR i=0,num_recs-1 DO BEGIN
record = ENVI_EVF_READ_RECORD(evf_id, i)
ENVI_CONVERT_FILE_COORDINATES, fid, xmap, ymap, record[0,*], record[1,*]
roi_id = ENVI_CREATE_ROI(color=1, ns = ns , nl = nl)
ENVI_DEFINE_ROI, roi_id, /polygon, xpts=REFORM(xMap),
ypts=REFORM(yMap)
roi_ids[i] = roi_id

IF i EQ 0 THEN BEGIN
xmin = ROUND(MIN(xMap,max = xMax))
yMin = ROUND(MIN(yMap,max = yMax))
ENDIF ELSE BEGIN
xmin = xMin < ROUND(MIN(xMap))
xMax = xMax > ROUND(MAX(xMap))
yMin = yMin < ROUND(MIN(yMap))
yMax = yMax > ROUND(MAX(yMap))
ENDELSE
ENDFOR
xMin = xMin >0
xmax = xMax < ns-1
yMin = yMin >0
yMin=yMin-3
ymax = yMax < nl-1
ymax=ymax+5;

ENVI_MASK_DOIT, AND_OR =1, /IN_MEMORY, ROI_IDS= roi_ids, ns = ns, nl =
nl, /inside, r_fid = m_fid
out_dims = [-1, xMin, xMax, yMin, yMax]
ENVI_MASK_APPLY_DOIT, FID = fid, POS = INDGEN(nb), DIMS =
out_dims, M_FID = m_fid, M_POS = [0], VALUE = 0, out_name = out_name,
R_FID = r_fid
ENVI_FILE_MNG, id =m_fid, /remove
ENDFOR
;ENVI_BATCH_EXIT
End
```

## PRO PROMEDIO\_ESPACIAL

; propósito: sacar el promedio espacial de cada una de las imágenes,  
; que están apiladas en un archivo .hdr

```
envi_select, title=' escoger', fid=fid, dims=dims, pos=pos
if (fid eq -1) then begin
print, 'cancelled'
return
endif
envi_file_query, fid, fname=fname
```

```
num_colum=dims[2]-dims[1]+1
num_fil= dims[4]-dims[3]+1
num_bands= n_elements(pos)
```

```
imagen=intarr(num_colum,num_fil)
data=intarr(num_colum,num_fil,num_bands)
for i=0, num_bands-1 do begin
imagen = envi_get_data(fid = fid, dims=dims, pos=pos[i])
data[*,*,i]=reverse(reform(imagen,num_colum,num_fil),2)
ENDFOR
help,data,/str
```

```
data=data/10000.0 ; agregado
sum_band=dblarr(num_bands)
for n_bands=0,num_bands-1 do begin
sum_band[n_bands]=total(data[*,*,n_bands])
;print,sum_band
endfor
;print, sum_band
;return
promedio=dblarr(num_bands)
for n_bands=0,num_bands-1 do begin
promedio[n_bands]=sum_band[n_bands]/(n_elements(where(data[*,*,n_bands]
] ne 0)))
endfor
T=TRANPOSE(PROMEDIO)
openw, lun
'D:\NDVI_MODIS_250\imagenes_modis_2014\prom_TAMBILLO_2014.txt',
/get_lun
; crea y guarda los promedios de cada imagen en un archivo .txt
printf,lun, T
free_lun,lun
```

```
;ndvi_ST=read_ascii('F:\tesis 2014\IMAGENES-TAMBILLO\imágenes
mensuales\2008\2febrero\NDVI_2008_feb.txt', data_start=0)
; aquí el comando read_ascii(), abre el archivo, con data_start=1,
; con data_start=1, lo que digo es que los datos los empiece a leer
; a partir de la 2 fila, uno puede cambiarlo.
```

```
;ndvi=ndvi_ST.field1[*,0]
; ndvi_chui.field1[*,0],aquí estoy extrayendo la columna 1(con filed1,
si hubiera mas columnas, habra field2,...),
```

```
; finalmente el gráfico
;ST=plot(ndvi, 'b', title='ST de NDVI Tambillo', xtitle='2008 - 2013',
ytitle='ndvi', Sym_index=5)
```

END

## ANEXO 02

DATOS DE PRECIPITACIÓN Y TEMPERATURA DEL AIRE PROPORCIONADOS POR LA SUBGERENCIA DE RECURSOS NATURALES Y MEDIO AMBIENTE DEL GOBIERNO REGIONAL DE AYACUCHO ESTACIÓN METEOROLÓGICA DE TAMBILLO.

### REGISTRO DE TEMPERATURAS MÁXIMAS Y MÍNIMAS PROMEDIO POR CADA MES 2000-2012 (°C)

ESTACIÓN : TAMBILLO      Dpto: AYACUCHO      Latitud : 13° 12' 54"S  
 CODIGO : 002      Prov: HUAMANGA      Longitud : 74° 06' 19"W  
 AÑO : 00-12      Dist: TAMBILLO      Altitud : 3343 msnm

#### MÁXIMA

AÑO	ENE	FEB	MAR	ABR	MAY	JUN	JUL	AGO	SEP	OCT	NOV	DIC
2000	21,8	21,8	21,8	21,8	21,8	21,8	21,8	21,8	21,8	21,8	21,8	21,8
2001	21,4	21,4	21,4	21,4	21,4	21,4	21,4	21,4	21,4	21,4	21,4	21,4
2002	24,9	24,9	24,9	24,9	24,9	24,9	24,9	24,9	24,9	24,9	24,9	24,9
2003	23,4	23,4	23,4	23,4	23,4	23,4	23,4	23,4	23,4	23,4	23,4	23,4
2004	24,3	24,3	24,3	24,3	24,3	24,3	24,3	24,3	24,3	24,3	24,3	24,3
2005	24,2	24,2	24,2	24,2	24,2	24,2	24,2	24,2	24,2	24,2	24,2	24,2
2006	22,2	22,2	22,2	22,2	22,2	22,2	22,2	22,2	22,2	22,2	22,2	22,2
2007	24,4	24,4	24,4	24,4	24,4	24,4	24,4	24,4	24,4	24,4	24,4	24,4
2008	20,3	21,0	21,4	23,6	23,4	22,0	22,4	24,4	23,8	22,8	23,8	23,6
2009	20,4	20,2	21,2	20,8	20,2	20,4	20,4	23,2	23,2	24,2	23,8	22,2
2010	21,2	22,2	21,2	22,0	22,2	21,4	21,8	22,4	24,4	23,7	23,9	22,6
2011	21,0	18,9	19,8	20,4	20,4	20,2	20,2	21,8	25,5	22,9	24,6	22,8
2012	21,2	19,4	19,3	19,8	20,1	20,4	20,6	21,4	22,6	23,4	23,4	22,4

#### MÍNIMA

AÑO	ENE	FEB	MAR	ABR	MAY	JUN	JUL	AGO	SET	OCT	NOV	DIC
2000	6,6	5	7	6,6	6	5,5	4,4	5,4	6,2	5,4	7,2	5,3
2001	7,2	6,9	6,8	6	5,6	4,5	5,1	4	6,1	5,7	7,3	5
2002	6,3	7,7	7,7	6	4,9	3,9	3,9	4,1	3,8	6,3	5,9	5,8
2003	7,4	6,8	6,4	5,6	5,3	5	6,3	6,7	7,5	8,7	8,9	9
2004	7,6	7	7,5	6,3	6	4,3	4,6	4,5	5,9	7,3	7,2	3,3
2005	6,9	6,9	7,9	6,4	6,4	5,4	4,2	5,8	6	6,2	6,1	6,8
2006	7	7,1	7,4	7,6	4,4	5,4	3,2	5,4	5,8	5,8	6,2	7,2
2007	5,8	5,8	6,4	6,8	5	4	4,8	5,2	5,8	5,4	5,8	5,3
2008	6,9	5,7	5,4	5,4	2,7	0,0	1,0	5,0	0,8	6,4	7,7	6,1
2009	7,0	4,8	7,0	7,2	4,8	6,2	6,0	5,2	6,4	6,6	7,2	6,8
2010	7,6	8,0	8,2	7,8	7,2	6,4	6,4	5,3	5,6	5,2	7,2	6,2
2011	6,2	5,9	6,6	7,4	5,6	6,6	5,2	6,3	6,4	6,4	4,0	5,2
2012	5,4	3,4	5,0	5,8	5,2	0,0	3,3	4,0	4,0	4,2	6,0	5,0

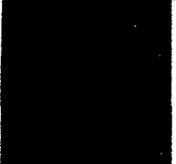
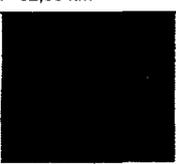
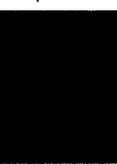
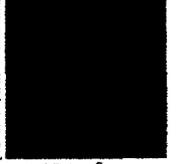
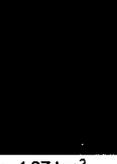
Fuente: Gobierno Regional de Ayacucho. Estación meteorológica de Tambillo

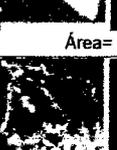
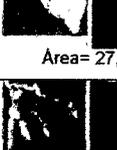
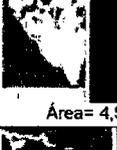
## REGISTRO DE PRECIPITACIONES PROMEDIO POR CADA MES 2000-2012 (mm)

<b>2000</b>	<b>ENE</b>	<b>FEB</b>	<b>MAR</b>	<b>ABR</b>	<b>MAY</b>	<b>JUN</b>	<b>JUL</b>	<b>AGO</b>	<b>SET</b>	<b>OCT</b>	<b>NOV</b>	<b>DIC</b>
MAX.	15,08	41,47	16,38	5,2	20,8	9,75	16,64	1,3	3,38	15,99	7,28	14,82
<b>2001</b>	<b>ENE</b>	<b>FEB</b>	<b>MAR</b>	<b>ABR</b>	<b>MAY</b>	<b>JUN</b>	<b>JUL</b>	<b>AGO</b>	<b>SET</b>	<b>OCT</b>	<b>NOV</b>	<b>DIC</b>
MAX.	22,1	13,26	27,95	11,31	15,99	5,33	11,31	7,15	5,2	11,05	48,49	9,1
<b>2002</b>	<b>ENE</b>	<b>FEB</b>	<b>MAR</b>	<b>ABR</b>	<b>MAY</b>	<b>JUN</b>	<b>JUL</b>	<b>AGO</b>	<b>SET</b>	<b>OCT</b>	<b>NOV</b>	<b>DIC</b>
MAX.	17,16	28,08	41,08	12,48	6,63	1,82	13,26	5,5	13,91	8,45	11,96	23,79
<b>2003</b>	<b>ENE</b>	<b>FEB</b>	<b>MAR</b>	<b>ABR</b>	<b>MAY</b>	<b>JUN</b>	<b>JUL</b>	<b>AGO</b>	<b>SET</b>	<b>OCT</b>	<b>NOV</b>	<b>DIC</b>
MAX.	21,5	38,4	17	19,5	5,4	0	0	14,3	4	1,9	4,6	25,5
<b>2004</b>	<b>ENE</b>	<b>FEB</b>	<b>MAR</b>	<b>ABR</b>	<b>MAY</b>	<b>JUN</b>	<b>JUL</b>	<b>AGO</b>	<b>SET</b>	<b>OCT</b>	<b>NOV</b>	<b>DIC</b>
MAX.	12,2	27,9	14,5	6,3	5,6	2,4	15,8	5,5	14,2	15,3	22,4	25,2
<b>2005</b>	<b>ENE</b>	<b>FEB</b>	<b>MAR</b>	<b>ABR</b>	<b>MAY</b>	<b>JUN</b>	<b>JUL</b>	<b>AGO</b>	<b>SET</b>	<b>OCT</b>	<b>NOV</b>	<b>DIC</b>
MAX.	29,2	18	47	8,3	0,2	0	3,5	1,5	8,2	12,5	14,2	26,4
<b>2006</b>	<b>ENE</b>	<b>FEB</b>	<b>MAR</b>	<b>ABR</b>	<b>MAY</b>	<b>JUN</b>	<b>JUL</b>	<b>AGO</b>	<b>SET</b>	<b>OCT</b>	<b>NOV</b>	<b>DIC</b>
MAX.	21,5	13,5	20,2	18,2	1,5	1,5	0	6,7	3,8	20,5	8	10,2
<b>2007</b>	<b>ENE</b>	<b>FEB</b>	<b>MAR</b>	<b>ABR</b>	<b>MAY</b>	<b>JUN</b>	<b>JUL</b>	<b>AGO</b>	<b>SET</b>	<b>OCT</b>	<b>NOV</b>	<b>DIC</b>
MAX.	17,16	17,68	20,41	27,04	2,47	0	14,69	1,04	8,19	19,5	10,14	24,44
<b>2008</b>	<b>ENE</b>	<b>FEB</b>	<b>MAR</b>	<b>ABR</b>	<b>MAY</b>	<b>JUN</b>	<b>JUL</b>	<b>AGO</b>	<b>SET</b>	<b>OCT</b>	<b>NOV</b>	<b>DIC</b>
MAX.	14,7	17,7	17,6	3,5	4,6	2,0	0,0	0,9	8,1	6,8	9,6	18,3
<b>2009</b>	<b>ENE</b>	<b>FEB</b>	<b>MAR</b>	<b>ABR</b>	<b>MAY</b>	<b>JUN</b>	<b>JUL</b>	<b>AGO</b>	<b>SET</b>	<b>OCT</b>	<b>NOV</b>	<b>DIC</b>
MAX.	25,4	21,1	15,6	19,1	12,9	0,0	4,2	0,2	6,6	8,2	17,2	17,6
<b>2010</b>	<b>ENE</b>	<b>FEB</b>	<b>MAR</b>	<b>ABR</b>	<b>MAY</b>	<b>JUN</b>	<b>JUL</b>	<b>AGO</b>	<b>SET</b>	<b>OCT</b>	<b>NOV</b>	<b>DIC</b>
MAX.	25,5	13,0	19,9	7,1	5,2	0,0	0,0	7,5	6,3	14,2	7,8	21,1
<b>2011</b>	<b>ENE</b>	<b>FEB</b>	<b>MAR</b>	<b>ABR</b>	<b>MAY</b>	<b>JUN</b>	<b>JUL</b>	<b>AGO</b>	<b>SET</b>	<b>OCT</b>	<b>NOV</b>	<b>DIC</b>
MAX.	28,1	41,6	25,7	18,7	11,2	4,0	6,6	2,2	14,3	8,3	25,8	28,6
<b>2012</b>	<b>ENE</b>	<b>FEB</b>	<b>MAR</b>	<b>ABR</b>	<b>MAY</b>	<b>JUN</b>	<b>JUL</b>	<b>AGO</b>	<b>SET</b>	<b>OCT</b>	<b>NOV</b>	<b>DIC</b>
MAX.	28,4	26,4	25,1	17,9	1,7	10,1	0,6	2,9	13,2	0,0	27,1	25,2

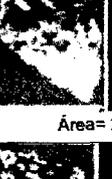
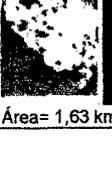
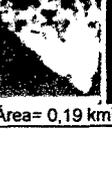
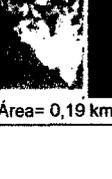
Fuente: Gobierno Regional de Ayacucho. Estación meteorológica de Tambillo

**ANEXO 03**

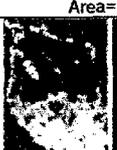
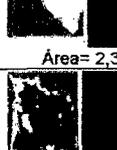
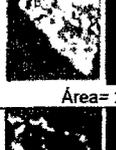
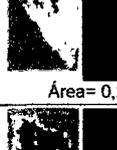
2000		Imágenes por área y tipo de vegetación por estaciones del año según el NDVI			
		VERANO	OTOÑO	INVIERNO	PRIMAVERA
TIPOA					
		Área=0 km <sup>2</sup>	Área=0 km <sup>2</sup>	Área=0 km <sup>2</sup>	Área=0 km <sup>2</sup>
TIPOB					
		Área=0 km <sup>2</sup>	Área=0 km <sup>2</sup>	Área=0 km <sup>2</sup>	Área=10,7 km <sup>2</sup>
TIPOC					
		Área= 8,21 km <sup>2</sup>	Área= 1,43 km <sup>2</sup>	Área= 8,34 km <sup>2</sup>	Área= 47,98 km <sup>2</sup>
TIPOD					
		Área= 51,34 km <sup>2</sup>	Área= 18,05 km <sup>2</sup>	Área= 61,54 km <sup>2</sup>	Área= 66,31 km <sup>2</sup>
TIPOE					
		Área= 62,05 km <sup>2</sup>	Área= 47,5 km <sup>2</sup>	Área= 53,17 km <sup>2</sup>	Área= 30,17 km <sup>2</sup>
TIPO F					
		Área= 24,87 km <sup>2</sup>	Área= 47,03 km <sup>2</sup>	Área= 23,86 km <sup>2</sup>	Área= 4,97 km <sup>2</sup>
TIPOG					
		Área= 3,55 km <sup>2</sup>	Área= 32,76 km <sup>2</sup>	Área= 4,04 km <sup>2</sup>	Área= 0,6 km <sup>2</sup>
TIPOH					
		Área= 0,97 km <sup>2</sup>	Área= 4,37 km <sup>2</sup>	Área= 0,24 km <sup>2</sup>	Área= 0,09 km <sup>2</sup>

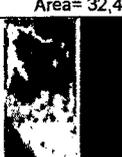
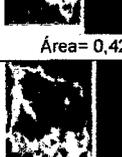
2001	VERANO	OTOÑO	INVIERNO	PRIMAVERA
TIPOA	 Área= 0 km <sup>2</sup>	 Área= 0 km <sup>2</sup>	 Área= 0 km <sup>2</sup>	 Área= 0 km <sup>2</sup>
TIPOB	 Área=10,7 km <sup>2</sup>	 Área= 0 km <sup>2</sup>	 Área= 0 km <sup>2</sup>	 Área= 7,3 km <sup>2</sup>
TIPOC	 Área= 47,98 km <sup>2</sup>	 Área= 2,67 km <sup>2</sup>	 Área= 14,07 km <sup>2</sup>	 Área= 42,47 km <sup>2</sup>
TIPOD	 Área= 66,31 km <sup>2</sup>	 Área= 25,34 km <sup>2</sup>	 Área= 63,19 km <sup>2</sup>	 Área= 75 km <sup>2</sup>
TIPOE	 Área= 30,17 km <sup>2</sup>	 Área= 53,29 km <sup>2</sup>	 Área= 50,95 km <sup>2</sup>	 Área= 27,97 km <sup>2</sup>
TIPOF	 Área= 4,97 km <sup>2</sup>	 Área= 42,83 km <sup>2</sup>	 Área= 19,76 km <sup>2</sup>	 Área= 4,55 km <sup>2</sup>
TIPOG	 Área= 0,6 km <sup>2</sup>	 Área= 24,56 km <sup>2</sup>	 Área= 3,07 km <sup>2</sup>	 Área= 0,29 km <sup>2</sup>
TIPOH	 Área= 0,09 km <sup>2</sup>	 Área= 2,55 km <sup>2</sup>	 Área= 0,18 km <sup>2</sup>	 Área= 0,18 km <sup>2</sup>

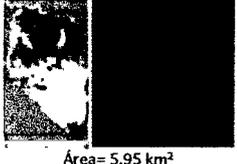
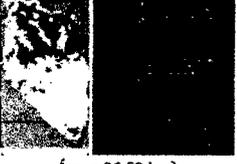
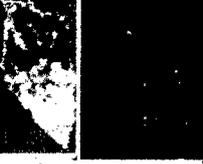
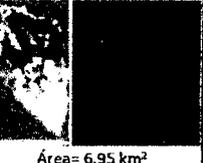
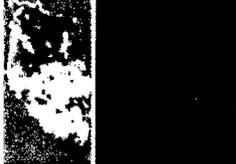
2002	VERANO	OTOÑO	INVIERNO	PRIMAVERA
TIPOA	 Área= 0 km <sup>2</sup>	 Área= 0 km <sup>2</sup>	 Área= 0 km <sup>2</sup>	 Área= 0 km <sup>2</sup>
TIPOB	 Área= 0 km <sup>2</sup>	 Área= 0 km <sup>2</sup>	 Área= 0 km <sup>2</sup>	 Área= 16 km <sup>2</sup>
TIPOC	 Área= 0,74 km <sup>2</sup>	 Área= 1,71 km <sup>2</sup>	 Área= 20,13 km <sup>2</sup>	 Área= 54,1 km <sup>2</sup>
TIPOD	 Área= 37,1 km <sup>2</sup>	 Área= 18,48 km <sup>2</sup>	 Área= 62,42 km <sup>2</sup>	 Área= 68,03 km <sup>2</sup>
TIPOE	 Área= 51,72 km <sup>2</sup>	 Área= 46,73 km <sup>2</sup>	 Área= 46,93 km <sup>2</sup>	 Área= 24,18 km <sup>2</sup>
TIPOF	 Área= 48,33 km <sup>2</sup>	 Área= 42,03 km <sup>2</sup>	 Área= 19,08 km <sup>2</sup>	 Área= 2,89 km <sup>2</sup>
TIPOG	 Área= 11,93 km <sup>2</sup>	 Área= 33,2 km <sup>2</sup>	 Área= 2,5 km <sup>2</sup>	 Área= 0,28 km <sup>2</sup>
TIPOH	 Área= 1,29 km <sup>2</sup>	 Área= 9,03 km <sup>2</sup>	 Área= 0,19 km <sup>2</sup>	 Área= 0,14 km <sup>2</sup>

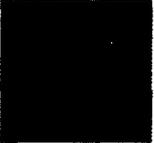
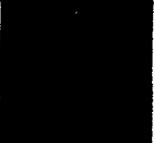
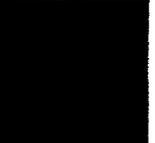
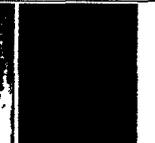
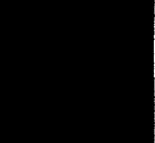
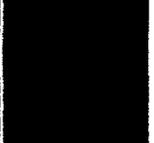
2003	VERANO	OTOÑO	INVIERNO	PRIMAVERA
TIPOA	 Área= 0 km <sup>2</sup>	 Área= 0 km <sup>2</sup>	 Área= 0 km <sup>2</sup>	 Área= 0 km <sup>2</sup>
TIPOB	 Área= 0 km <sup>2</sup>	 Área= 0 km <sup>2</sup>	 Área= 0 km <sup>2</sup>	 Área= 0 km <sup>2</sup>
TIPOC	 Área= 4,68 km <sup>2</sup>	 Área= 0,3 km <sup>2</sup>	 Área= 3,67 km <sup>2</sup>	 Área= 16,05 km <sup>2</sup>
TIPOD	 Área= 35,16 km <sup>2</sup>	 Área= 21,07 km <sup>2</sup>	 Área= 49,44 km <sup>2</sup>	 Área= 79,76 km <sup>2</sup>
TIPOE	 Área= 44,7 km <sup>2</sup>	 Área= 60,87 km <sup>2</sup>	 Área= 68,78 km <sup>2</sup>	 Área= 41,12 km <sup>2</sup>
TIPOF	 Área= 43,64 km <sup>2</sup>	 Área= 50,24 km <sup>2</sup>	 Área= 25,86 km <sup>2</sup>	 Área= 12,22 km <sup>2</sup>
TIPOG	 Área= 20,4 km <sup>2</sup>	 Área= 17,1 km <sup>2</sup>	 Área= 3,18 km <sup>2</sup>	 Área= 1,77 km <sup>2</sup>
TIPOH	 Área= 2,74 km <sup>2</sup>	 Área= 1,63 km <sup>2</sup>	 Área= 0,19 km <sup>2</sup>	 Área= 0,19 km <sup>2</sup>

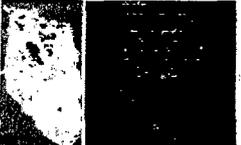
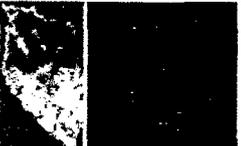
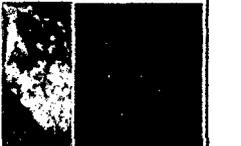
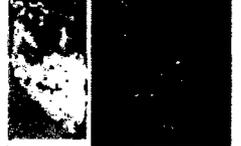
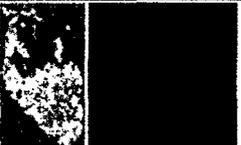
2004	VERANO	OTOÑO	INVIERNO	PRIMAVERA
TIPOA	 Área= 0 km <sup>2</sup>	 Área= 0 km <sup>2</sup>	 Área= 0 km <sup>2</sup>	 Área= 0 km <sup>2</sup>
TIPOB	 Área= 0 km <sup>2</sup>	 Área= 0 km <sup>2</sup>	 Área= 0 km <sup>2</sup>	 Área= 9,2 km <sup>2</sup>
TIPOC	 Área= 2,13 km <sup>2</sup>	 Área= 1,85 km <sup>2</sup>	 Área= 23,69 km <sup>2</sup>	 Área= 51,12 km <sup>2</sup>
TIPOD	 Área= 32,47 km <sup>2</sup>	 Área= 27,43 km <sup>2</sup>	 Área= 78,69 km <sup>2</sup>	 Área= 72,77 km <sup>2</sup>
TIPOE	 Área= 66,26 km <sup>2</sup>	 Área= 46,57 km <sup>2</sup>	 Área= 35,45 km <sup>2</sup>	 Área= 23,45 km <sup>2</sup>
TIPOF	 Área= 41,17 km <sup>2</sup>	 Área= 44,23 km <sup>2</sup>	 Área= 12,44 km <sup>2</sup>	 Área= 2,35 km <sup>2</sup>
TIPOG	 Área= 8,04 km <sup>2</sup>	 Área= 26,41 km <sup>2</sup>	 Área= 0,79 km <sup>2</sup>	 Área= 0,34 km <sup>2</sup>
TIPOH	 Área= 1,08 km <sup>2</sup>	 Área= 4,7 km <sup>2</sup>	 Área= 0,05 km <sup>2</sup>	 Área= 0,18 km <sup>2</sup>

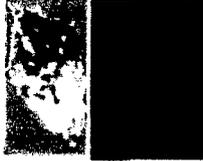
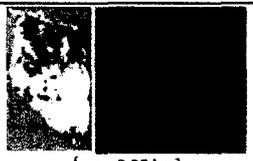
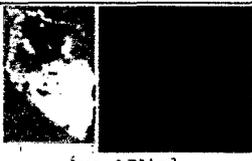
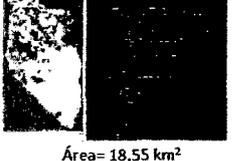
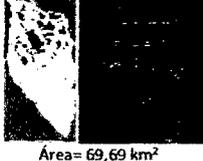
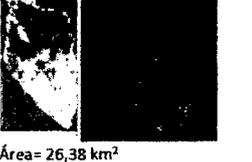
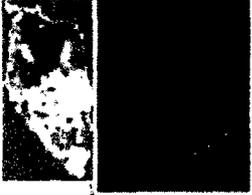
2005	VERANO	OTOÑO	INVIERNO	PRIMAVERA
TIPOA	 Área= 0 km <sup>2</sup>	 Área= 0 km <sup>2</sup>	 Área= 0 km <sup>2</sup>	 Área= 0 km <sup>2</sup>
TIPOB	 Área= 0 km <sup>2</sup>	 Área= 0 km <sup>2</sup>	 Área= 0 km <sup>2</sup>	 Área= 10,7 km <sup>2</sup>
TIPOC	 Área= 5,21 km <sup>2</sup>	 Área= 2,36 km <sup>2</sup>	 Área= 19,11 km <sup>2</sup>	 Área= 58,34 km <sup>2</sup>
TIPOD	 Área= 38,17 km <sup>2</sup>	 Área= 27,75 km <sup>2</sup>	 Área= 74,54 km <sup>2</sup>	 Área= 66,92 km <sup>2</sup>
TIPOE	 Área= 43,57 km <sup>2</sup>	 Área= 43,14 km <sup>2</sup>	 Área= 42,59 km <sup>2</sup>	 Área= 22,18 km <sup>2</sup>
TIPOF	 Área= 50,15 km <sup>2</sup>	 Área= 51,52 km <sup>2</sup>	 Área= 13,82 km <sup>2</sup>	 Área= 2,39 km <sup>2</sup>
TIPOG	 Área= 12,36 km <sup>2</sup>	 Área= 24,86 km <sup>2</sup>	 Área= 0,93 km <sup>2</sup>	 Área= 0,2 km <sup>2</sup>
TIPOH	 Área= 1,75 km <sup>2</sup>	 Área= 1,53 km <sup>2</sup>	 Área= 0,23 km <sup>2</sup>	 Área= 0,14 km <sup>2</sup>

2006	VERANO	OTOÑO	INVIERNO	PRIMAVERA
TIPOA	 Área= 0 km <sup>2</sup>	 Área= 0 km <sup>2</sup>	 Área= 0 km <sup>2</sup>	 Área= 0 km <sup>2</sup>
TIPOB	 Área= 0 km <sup>2</sup>	 Área= 0 km <sup>2</sup>	 Área= 0 km <sup>2</sup>	 Área= 5,5 km <sup>2</sup>
TIPOC	 Área= 3,84 km <sup>2</sup>	 Área= 3,68 km <sup>2</sup>	 Área= 12,88 km <sup>2</sup>	 Área= 41,18 km <sup>2</sup>
TIPOD	 Área= 41,91 km <sup>2</sup>	 Área= 34,31 km <sup>2</sup>	 Área= 71,25 km <sup>2</sup>	 Área= 72,35 km <sup>2</sup>
TIPOE	 Área= 43,24 km <sup>2</sup>	 Área= 49,02 km <sup>2</sup>	 Área= 46,87 km <sup>2</sup>	 Área= 32,44 km <sup>2</sup>
TIPOF	 Área= 44,65 km <sup>2</sup>	 Área= 42,44 km <sup>2</sup>	 Área= 18,29 km <sup>2</sup>	 Área= 4,09 km <sup>2</sup>
TIPOG	 Área= 16,29 km <sup>2</sup>	 Área= 19,63 km <sup>2</sup>	 Área= 1,7 km <sup>2</sup>	 Área= 0,42 km <sup>2</sup>
TIPOH	 Área= 1,35 km <sup>2</sup>	 Área= 2,13 km <sup>2</sup>	 Área= 0,18 km <sup>2</sup>	 Área= 0,14 km <sup>2</sup>

2007	VERANO	OTOÑO	INVIERNO	PRIMAVERA
TIPOA	 Área= 0 km <sup>2</sup>	 Área= 0 km <sup>2</sup>	 Área= 0 km <sup>2</sup>	 Área= 0 km <sup>2</sup>
TIPOB	 Área= 0 km <sup>2</sup>	 Área= 0 km <sup>2</sup>	 Área= 0 km <sup>2</sup>	 Área= 0 km <sup>2</sup>
TIPOC	 Área= 5,95 km <sup>2</sup>	 Área= 1,47 km <sup>2</sup>	 Área= 22,15 km <sup>2</sup>	 Área= 28,21 km <sup>2</sup>
TIPOD	 Área= 44,84 km <sup>2</sup>	 Área= 19,62 km <sup>2</sup>	 Área= 72,15 km <sup>2</sup>	 Área= 71,52 km <sup>2</sup>
TIPOE	 Área= 36,52 km <sup>2</sup>	 Área= 46,72 km <sup>2</sup>	 Área= 39,61 km <sup>2</sup>	 Área= 43,88 km <sup>2</sup>
TIPOF	 Área= 35,31 km <sup>2</sup>	 Área= 44,33 km <sup>2</sup>	 Área= 16,11 km <sup>2</sup>	 Área= 6,95 km <sup>2</sup>
TIPOG	 Área= 24,65 km <sup>2</sup>	 Área= 31,3 km <sup>2</sup>	 Área= 1,07 km <sup>2</sup>	 Área= 0,39 km <sup>2</sup>
TIPOH	 Área= 4,03 km <sup>2</sup>	 Área= 7,74 km <sup>2</sup>	 Área= 0,14 km <sup>2</sup>	 Área= 0,18 km <sup>2</sup>

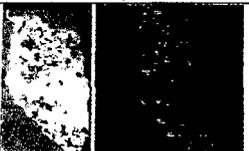
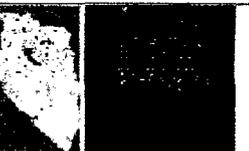
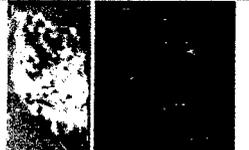
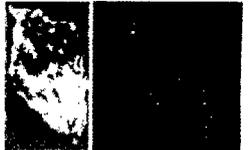
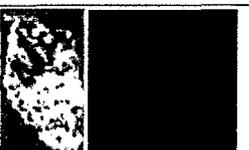
2008	VERANO	OTOÑO	INVIERNO	PRIMAVERA
TIPOA	  Área= 0 km <sup>2</sup>	  Área= 0 km <sup>2</sup>	  Área= 0 km <sup>2</sup>	  Área= 0 km <sup>2</sup>
TIPOB	  Área= 0 km <sup>2</sup>	  Área= 0 km <sup>2</sup>	  Área= 0 km <sup>2</sup>	  Área= 10,1 km <sup>2</sup>
TIPOC	  Área= 3,54 km <sup>2</sup>	  Área= 7,19 km <sup>2</sup>	  Área= 28,54 km <sup>2</sup>	  Área= 50,48 km <sup>2</sup>
TIPOD	  Área= 41,59 km <sup>2</sup>	  Área= 40,58 km <sup>2</sup>	  Área= 66,92 km <sup>2</sup>	  Área= 69,97 km <sup>2</sup>
TIPOE	  Área= 53,9 km <sup>2</sup>	  Área= 40,15 km <sup>2</sup>	  Área= 41,81 km <sup>2</sup>	  Área= 25,13 km <sup>2</sup>
TIPOF	  Área= 39 km <sup>2</sup>	  Área= 38,51 km <sup>2</sup>	  Área= 13,11 km <sup>2</sup>	  Área= 4,02 km <sup>2</sup>
TIPOG	  Área= 12,07 km <sup>2</sup>	  Área= 23,49 km <sup>2</sup>	  Área= 0,67 km <sup>2</sup>	  Área= 0,46 km <sup>2</sup>
TIPOH	  Área= 1,02 km <sup>2</sup>	  Área= 1,28 km <sup>2</sup>	  Área= 0,18 km <sup>2</sup>	  Área= 0,18 km <sup>2</sup>

2009	VERANO	OTOÑO	INVIERNO	PRIMAVERA
TIPOA	 Área= 0 km <sup>2</sup>	 Área= 0 km <sup>2</sup>	 Área= 0 km <sup>2</sup>	 Área= 0 km <sup>2</sup>
TIPOB	 Área= 1 km <sup>2</sup>	 Área= 0 km <sup>2</sup>	 Área= 0 km <sup>2</sup>	 Área= 5 km <sup>2</sup>
TIPOC	 Área= 9,1 km <sup>2</sup>	 Área= 3,91 km <sup>2</sup>	 Área= 13,26 km <sup>2</sup>	 Área= 39,22 km <sup>2</sup>
TIPOD	 Área= 46,14 km <sup>2</sup>	 Área= 28,47 km <sup>2</sup>	 Área= 62,88 km <sup>2</sup>	 Área= 79,49 km <sup>2</sup>
TIPOE	 Área= 48,18 km <sup>2</sup>	 Área= 42,8 km <sup>2</sup>	 Área= 49,78 km <sup>2</sup>	 Área= 27,28 km <sup>2</sup>
TIPOF	 Área= 36,16 km <sup>2</sup>	 Área= 36,55 km <sup>2</sup>	 Área= 22,83 km <sup>2</sup>	 Área= 3,67 km <sup>2</sup>
TIPOG	 Área= 10,51 km <sup>2</sup>	 Área= 33,96 km <sup>2</sup>	 Área= 2,26 km <sup>2</sup>	 Área= 0,88 km <sup>2</sup>
TIPOH	 Área= 1,08 km <sup>2</sup>	 Área= 5,54 km <sup>2</sup>	 Área= 0,14 km <sup>2</sup>	 Área= 0,19 km <sup>2</sup>

2010	VERANO	OTOÑO	INVIERNO	PRIMAVERA
TIPOA	 Área= 0 km <sup>2</sup>	 Área= 0 km <sup>2</sup>	 Área= 0 km <sup>2</sup>	 Área= 0 km <sup>2</sup>
TIPOB	 Área= 0 km <sup>2</sup>	 Área= 0 km <sup>2</sup>	 Área= 0 km <sup>2</sup>	 Área= 0 km <sup>2</sup>
TIPOC	 Área= 3,85 km <sup>2</sup>	 Área= 1,74 km <sup>2</sup>	 Área= 7,16 km <sup>2</sup>	 Área= 17,04 km <sup>2</sup>
TIPOD	 Área= 31,21 km <sup>2</sup>	 Área= 18,55 km <sup>2</sup>	 Área= 56,3 km <sup>2</sup>	 Área= 69,69 km <sup>2</sup>
TIPOE	 Área= 47,53 km <sup>2</sup>	 Área= 43,73 km <sup>2</sup>	 Área= 56,43 km <sup>2</sup>	 Área= 49,61 km <sup>2</sup>
TIPOF	 Área= 44,91 km <sup>2</sup>	 Área= 42,8 km <sup>2</sup>	 Área= 26,38 km <sup>2</sup>	 Área= 13,38 km <sup>2</sup>
TIPOG	 Área= 20,48 km <sup>2</sup>	 Área= 32,45 km <sup>2</sup>	 Área= 4,67 km <sup>2</sup>	 Área= 1,13 km <sup>2</sup>
TIPOH	 Área= 3,18 km <sup>2</sup>	 Área= 11,94 km <sup>2</sup>	 Área= 0,28 km <sup>2</sup>	 Área= 0,28 km <sup>2</sup>

2011	VERANO	OTOÑO	INVIERNO	PRIMAVERA
TIPOA	 Área= 0 km <sup>2</sup>	 Área= 0 km <sup>2</sup>	 Área= 0 km <sup>2</sup>	 Área= 0 km <sup>2</sup>
TIPOB	 Área= 0 km <sup>2</sup>	 Área= 0 km <sup>2</sup>	 Área= 0 km <sup>2</sup>	 Área= 0 km <sup>2</sup>
TIPOC	 Área= 1,38 km <sup>2</sup>	 Área= 0,32 km <sup>2</sup>	 Área= 0,65 km <sup>2</sup>	 Área= 8,12 km <sup>2</sup>
TIPOD	 Área= 20,42 km <sup>2</sup>	 Área= 7,59 km <sup>2</sup>	 Área= 16,6 km <sup>2</sup>	 Área= 54,62 km <sup>2</sup>
TIPOE	 Área= 54,09 km <sup>2</sup>	 Área= 36,88 km <sup>2</sup>	 Área= 69,89 km <sup>2</sup>	 Área= 63,88 km <sup>2</sup>
TIPOF	 Área= 46,64 km <sup>2</sup>	 Área= 52,4 km <sup>2</sup>	 Área= 48,04 km <sup>2</sup>	 Área= 21,48 km <sup>2</sup>
TIPOG	 Área= 23,2 km <sup>2</sup>	 Área= 47,16 km <sup>2</sup>	 Área= 14,34 km <sup>2</sup>	 Área= 2,81 km <sup>2</sup>
TIPOH	 Área= 5,42 km <sup>2</sup>	 Área= 6,85 km <sup>2</sup>	 Área= 1,71 km <sup>2</sup>	 Área= 0,28 km <sup>2</sup>

2012	VERANO	OTOÑO	INVIERNO	PRIMAVERA
TIPOA	 Área= 0 km <sup>2</sup>	 Área= 0 km <sup>2</sup>	 Área= 0 km <sup>2</sup>	 Área= 0 km <sup>2</sup>
TIPOB	 Área= 0 km <sup>2</sup>	 Área= 0 km <sup>2</sup>	 Área= 0 km <sup>2</sup>	 Área= 0 km <sup>2</sup>
TIPOC	 Área= 1,29 km <sup>2</sup>	 Área= 0,42 km <sup>2</sup>	 Área= 0,92 km <sup>2</sup>	 Área= 2,06 km <sup>2</sup>
TIPOD	 Área= 23,27 km <sup>2</sup>	 Área= 9,66 km <sup>2</sup>	 Área= 20,7 km <sup>2</sup>	 Área= 36,76 km <sup>2</sup>
TIPOE	 Área= 58,3 km <sup>2</sup>	 Área= 36,87 km <sup>2</sup>	 Área= 75,35 km <sup>2</sup>	 Área= 77,36 km <sup>2</sup>
TIPOF	 Área= 51,54 km <sup>2</sup>	 Área= 52,41 km <sup>2</sup>	 Área= 43,68 km <sup>2</sup>	 Área= 30,97 km <sup>2</sup>
TIPOG	 Área= 15,74 km <sup>2</sup>	 Área= 41,88 km <sup>2</sup>	 Área= 9,73 km <sup>2</sup>	 Área= 3,53 km <sup>2</sup>
TIPOH	 Área= 1,06 km <sup>2</sup>	 Área= 9,97 km <sup>2</sup>	 Área= 0,83 km <sup>2</sup>	 Área= 0,46 km <sup>2</sup>

2013	VERANO	OTOÑO	INVIERNO	PRIMAVERA
TIPOA	 Área= 0 km <sup>2</sup>	 Área= 0 km <sup>2</sup>	 Área= 0 km <sup>2</sup>	 Área= 0 km <sup>2</sup>
TIPOB	 Área= 0 km <sup>2</sup>	 Área= 0 km <sup>2</sup>	 Área= 0 km <sup>2</sup>	 Área= 0 km <sup>2</sup>
TIPOC	 Área= 2,22 km <sup>2</sup>	 Área= 00,41 km <sup>2</sup>	 Área= 4,66 km <sup>2</sup>	 Área= 10,28 km <sup>2</sup>
TIPOD	 Área= 22,09 km <sup>2</sup>	 Área= 3,88 km <sup>2</sup>	 Área= 51,11 km <sup>2</sup>	 Área= 60,28 km <sup>2</sup>
TIPOE	 Área= 51,76 km <sup>2</sup>	 Área= 29,18 km <sup>2</sup>	 Área= 65,05 km <sup>2</sup>	 Área= 54,19 km <sup>2</sup>
TIPOF	 Área= 47,43 km <sup>2</sup>	 Área= 59,99 km <sup>2</sup>	 Área= 25,49 km <sup>2</sup>	 Área= 22,61 km <sup>2</sup>
TIPOG	 Área= 23,3 km <sup>2</sup>	 Área= 43,81 km <sup>2</sup>	 Área= 3,74 km <sup>2</sup>	 Área= 2,56 km <sup>2</sup>
TIPOH	 Área= 3,45 km <sup>2</sup>	 Área= 13 km <sup>2</sup>	 Área= 0,19 km <sup>2</sup>	 Área= 0,37 km <sup>2</sup>

2014	VERANO	OTOÑO	INVIERNO	PRIMAVERA
TIPOA	 Área= 0 km <sup>2</sup>	 Área= 0 km <sup>2</sup>	 Área= 0 km <sup>2</sup>	 Área= 0 km <sup>2</sup>
TIPOB	 Área= 0 km <sup>2</sup>	 Área= 0 km <sup>2</sup>	 Área= 0 km <sup>2</sup>	 Área= 2,3 km <sup>2</sup>
TIPOC	 Área= 2,31 km <sup>2</sup>	 Área= 0,41 km <sup>2</sup>	 Área= 2,59 km <sup>2</sup>	 Área= 12,43 km <sup>2</sup>
TIPOD	 Área= 19,37 km <sup>2</sup>	 Área= 7,09 km <sup>2</sup>	 Área= 39,22 km <sup>2</sup>	 Área= 57,22 km <sup>2</sup>
TIPOE	 Área= 52,07 km <sup>2</sup>	 Área= 36,26 km <sup>2</sup>	 Área= 66,17 km <sup>2</sup>	 Área= 57,41 km <sup>2</sup>
TIPOF	 Área= 50,19 km <sup>2</sup>	 Área= 50,86 km <sup>2</sup>	 Área= 34,84 km <sup>2</sup>	 Área= 21,07 km <sup>2</sup>
TIPOG	 Área= 24,2 km <sup>2</sup>	 Área= 43,53 km <sup>2</sup>	 Área= 6,95 km <sup>2</sup>	 Área= 1,82 km <sup>2</sup>
TIPOH	 Área= 2,16 km <sup>2</sup>	 Área= 12,03 km <sup>2</sup>	 Área= 0,51 km <sup>2</sup>	 Área= 0,14 km <sup>2</sup>

## ANEXO N° 04

### EJEMPLO DE CÁLCULO Y VALORES DEL ÍNDICE DE VEGETACIÓN DE DIFERENCIA NORMALIZADA (NDVI)

$$NDVI = \frac{\rho_{IRC} - \rho_R}{\rho_{IRC} + \rho_R} \quad (2.20)$$

donde:

$\rho_{IRC}$  : reflectividad en el infrarrojo cercano

$\rho_R$  : reflectividad en el rojo

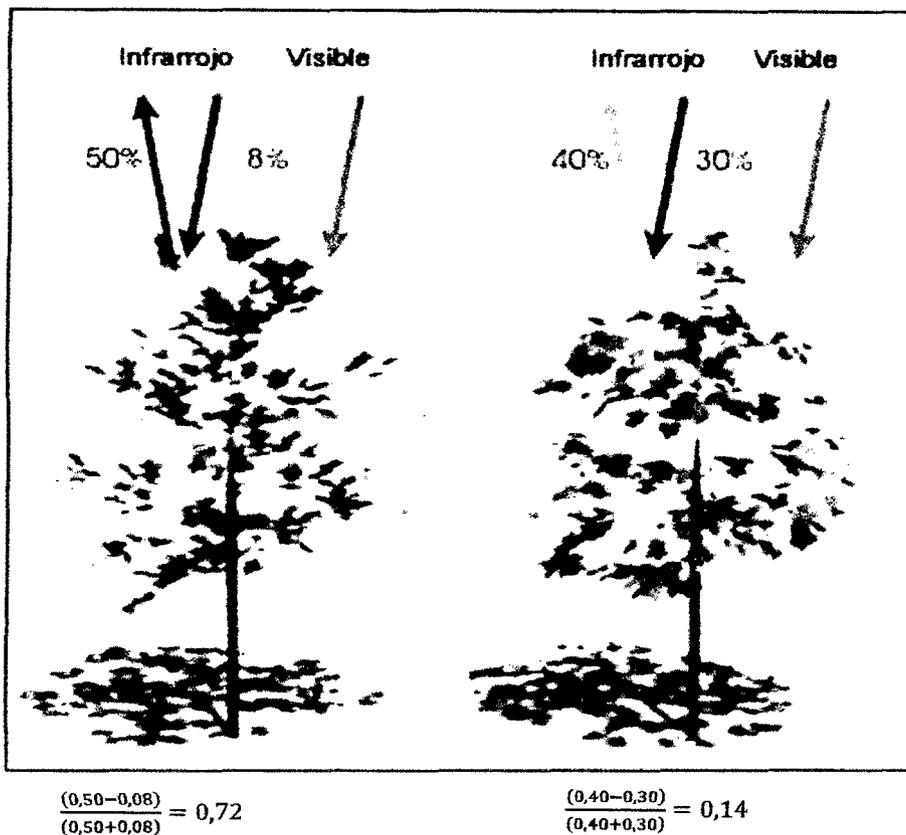


Imagen: Ejemplos de cálculo y valores de NDVI

Fuente: <http://concurso.cnice.mec.es>

El NDVI se basa en la diferencia de reflectancia que muestra la vegetación sana en la banda visible (20%) y el infrarrojo cercano (60%). Los valores obtenidos por este índice varían entre -1 y 1, siendo los valores positivos los correspondientes a zonas de biomasa vegetal.

Los valores negativos se producen debido a un mayor nivel de reflectancia en el espectro, y pertenecerán a elementos tales como nubes, nieve, agua, rocas etc.