

**UNIVERSIDAD NACIONAL AGRARIA
LA MOLINA**

FACULTAD DE INGENIERÍA AGRÍCOLA



**“EVALUACIÓN DE SEQUÍAS Y DEL RIESGO POTENCIAL A LA
OCURRENCIA DE INCENDIOS FORESTALES EN ECOSISTEMAS
ALTOANDINOS MEDIANTE USO DE SENSORES REMOTOS”**

**TESIS PARA OPTAR EL TÍTULO DE
INGENIERO AGRÍCOLA**

YERSON JAIME CCANCHI ESPINOZA

LIMA – PERÚ

2021

UNIVERSIDAD NACIONAL AGRARIA LA MOLINA

FACULTAD DE INGENIERIA AGRICOLA

**“EVALUACIÓN DE SEQUÍAS Y DEL RIESGO POTENCIAL A LA
OCURRENCIA DE INCENDIOS FORESTALES EN ECOSISTEMAS
ALTOANDINOS MEDIANTE USO DE SENSORES REMOTOS”**

TESIS PARA OPTAR EL TITULO DE:

INGENIERO AGRÍCOLA

Presentado por:

BACH. YERSON JAIME CCANCHI ESPINOZA

Sustentado y aprobado por el siguiente jurado:

Dr. VÍCTOR LEVINGSTON PEÑA GUILLEN
Presidente

Dr. RAÚL ARNALDO ESPINOZA VILLAR
Asesor

Mestre JORGE LUIS DÍAZ RIMARACHIN
Miembro

Ing. ANTONIO CELESTINO ENCISO GUTIÉRREZ
Miembro

Dr. RICARDO ZUBIETA BARRAGÁN
Co-Asesor

LIMA – PERÚ

2021

DEDICATORIA

A mis hermosos padres Julia y Fortunato,

por todo el amor, comprensión, sacrificio y la confianza en cada momento de mi vida.

A mis hermanos Johnny y Lucio,

por enseñarme, cuidarme y quererme tanto al ser el menor de todos.

AGRADECIMIENTO

Esta tesis no sería posible sin ayuda de las personas e instituciones que contribuyeron de manera directa o indirecta en la investigación. Deseo expresar mi agradecimiento a todos ellos por su importante colaboración para el desarrollo de este estudio que se enmarca en varias ramas de la ciencia.

Dedico mi más sincero agradecimiento:

A mi asesor, Dr. Raúl Espinoza, profesor de la Facultad de Ingeniería Agrícola de la Universidad Nacional Agraria La Molina, investigador y especialista en teledetección aplicada. Darle mis agradecimientos por brindarme tiempo y sus amplios conocimientos que fueron valiosos para la mejora de esta tesis.

A mi co-asesor, Dr. Ricardo Zubieta, investigador del Instituto Geofísico del Perú, por sus enseñanzas, conocimientos y paciencia que han sido importante para mi formación. Resaltando que fue él quien propuso y realizó la gestión para que se pueda desarrollar la tesis con el fin de contribuir a la gestión forestal y el desarrollo del país.

Al Ing. Fernando Prudencio, por las críticas, observaciones y todo el apoyo incondicional principalmente en mis primeros pasos en programación con el lenguaje R.

A mis padres Julia y Fortunato, a mis hermanos Lucio y Johnny, quienes me apoyaron tanto emocional, como económicamente desde siempre, sin ellos no hubiera sido posible desarrollarme como profesional.

A todos mis amigos de siempre y a los que conocí en el IGP, por acompañarme en esta etapa.

A todas las personas queridas que hoy no se encuentran en esta vida pero que siempre estarán en mi corazón y mi mente.

Gracias a todos y cada uno de ustedes, siempre les estaré agradecidos.

ÍNDICE GENERAL

I. INTRODUCCIÓN	1
1.1 Justificación de la investigación	1
1.2 Problemática de los incendios forestales en el Perú y el Mundo	2
1.3 Ciclo hidrológico e impacto de eventos de sequía	3
1.4 Área de estudio	5
1.4.1 Ubicación geográfica	5
1.4.2 Escenario físico biológico	6
1.4.3 Escenario socioeconómico	11
1.5 Objetivos.....	14
1.5.1 Objetivo general	14
1.5.2 Objetivos específicos	14
II. REVISIÓN DE LITERATURA	15
2.1 Distribución espacial y ciclo anual de los incendios en el Perú	15
2.2 Circulación atmosférica en la región andino-amazónica del Perú	19
2.3 Distribución espacial y temporal de las precipitaciones en el Perú.....	22
2.4 Sequías extremas e incendios en el Perú	24
2.5 Factores antrópicos asociados a la ocurrencia de incendios en el Perú.....	26
2.6 Índices obtenidos a partir de satélites para el monitoreo del desarrollo de condiciones vegetativas y asociados.....	29
2.7 Espectro electromagnético.....	31
2.8 Condiciones biofísicas de la vegetación y su relación con la óptica/radiación electromagnética.....	32
2.9 Satélites y el monitoreo terrestre	34
2.9.1 Antecedentes.....	34
2.9.2 Proyecto Earth Observing System (EOS) - Moderate Resolution Imaging Spectroradiometer (MODIS)	34
2.9.3 Sensor MODIS	35
2.9.4 Niveles de procesamiento	38
2.9.5 Productos MODLAND.....	39
2.9.6 Productos MOD09.....	40

2.10	Herramientas para el procesamiento de datos	40
2.10.1	Sistemas de información geográfica.....	40
2.10.2	Análisis de datos satelitales a partir de softwares.....	43
2.10.3	Análisis de datos satelitales a partir de lenguajes de programación.....	45
III.	METODOLOGÍA.....	48
3.1	Materiales	48
3.1.1	Datos estimados a partir de sensoramiento remoto	48
3.1.2	Datos meteorológicos	50
3.1.3	Datos SIG	55
3.2	Metodología.....	57
3.2.1	Preparación de datos.....	57
3.2.2	Evaluación de datos de incendios forestales	59
3.2.3	Análisis de variables climáticas y vegetativas.....	60
3.2.4	Análisis de eventos de sequías.....	66
3.2.5	Evaluación de parámetros climáticos	68
IV.	RESULTADOS Y DISCUSIÓN.....	70
4.1	Regímenes climáticos en el departamento de Cajamarca y Cusco.....	70
4.2	Registro histórico de incendios en Cajamarca y Cusco.....	71
4.3	Análisis de la distribución temporal y espacial de los incendios forestales, según el tipo de cobertura vegetal, a lo largo de intervalos altitudinales	72
4.4	Caracterización espacial de sequías.....	79
4.5	Análisis de tendencia interanual de la vegetación	82
4.6	Análisis espacial de anomalías estandarizadas de NDVI durante años de sequía extrema	83
4.7	Relación entre las anomalías estandarizadas de NDVI y la ocurrencia de incendios forestales durante los años de sequía.....	87
4.8	Análisis de las condiciones vegetativas mensuales durante años de sequía extrema..	88
4.9	Análisis la respuesta de la vegetación a condiciones de sequía	91
4.10	Análisis mensual de las variables climáticas por intervalos de altitud.....	94
4.11	Análisis de las condiciones climáticas medias durante el periodo seco	96
4.12	Estimación de umbrales de precipitación y temperatura para el análisis de periodos secos y calurosos	98
4.13	Evaluación de parámetros climáticos	101

4.14	Correlación entre variables climáticas, parámetros climáticos e índices espectrales con la frecuencia acumulada de incendios forestales	112
4.15	Comportamiento estacional de los índices de vegetación y frecuencia de incendios forestales	128
V.	CONCLUSIONES	132
VI.	RECOMENDACIONES	136
VII.	BIBLIOGRAFÍA	137
VIII.	ANEXOS	158

ÍNDICE DE TABLAS

Tabla 1: Superficie de los tipos de cobertura vegetal en el departamento de Cajamarca.....	9
Tabla 2: Descripción de las unidades de cobertura en la región Cusco	11
Tabla 3: Valor Agregado Bruto 2017 (en miles de soles) de las actividades económicas en el departamento de Cajamarca.....	12
Tabla 4: Valor Agregado Bruto 2017 (en miles de soles) de las actividades económicas en el departamento de Cusco.....	13
Tabla 5: Principales causas de incendios forestales en la sierra peruana	27
Tabla 6: Características de las bandas 1 a la 19 del sensor MODIS. SNR: radio señal – ruido. Radianza espectral en W/ espectral	37
Tabla 7: Características de las bandas 20 a la 36 del sensor MODIS. NE (delta) T requerido: Diferencia de temperatura (K) equivalente al ruido	38
Tabla 8: Conjunto de datos del producto MOD09A1.....	49
Tabla 9: Descripción del control de calidad QA state – 16 bits (se resalta los filtros utilizados en este estudio)	58
Tabla 10: Descripción de significancia de la prueba Mann-Kendall para $\alpha = 0.05$	65
Tabla 11: Categorización de anomalías estandarizadas de NDVI.....	66
Tabla 12: Clasificación de las condiciones de sequía según SPI	68
Tabla 13: Resultados de la prueba de Mann-Kendall aplicado para detección de tendencia de índices espectrales en el periodo 2002-2016 en la región Cajamarca y Cusco	83
Tabla 14: Relación entre las anomalías estandarizadas de NDVI y la ocurrencia de incendios forestales en ecosistemas naturales durante años de sequía en Cajamarca	88
Tabla 15: Relación entre las anomalías estandarizadas de NDVI y la ocurrencia de incendios forestales en ecosistemas naturales durante años de sequía en Cusco	88
Tabla 16: Umbrales de PA, DDF, HDF y VARI identificados para el inicio de la temporada de incendios forestales sobre los pastizales andinos, matorrales andinos y bosques naturales en Cajamarca	131
Tabla 17: Umbrales de PA, DDF, HDF y VARI identificados para el inicio de la temporada de incendios forestales sobre los pastizales andinos, matorrales andinos y bosques naturales en Cusco	131

ÍNDICE DE FIGURAS

Figura 1: Esquema del balance hídrico promedio global anual del ciclo hidrológico, en unidades relativas a un valor 100 respecto a la tasa de precipitación terrestre	4
Figura 2: Área de estudio correspondiente a las regiones Cajamarca y Cusco	6
Figura 3: Mapa de subcuencas hidrográficas de la región Cajamarca	8
Figura 4: Mapa de subcuencas hidrográficas de la región Cusco	10
Figura 5: Mapa regional (político administrativo) de ocurrencia de incendios forestales ..	15
Figura 6: Mapa de peligro de incendios forestales para los Andes peruanos.....	16
Figura 7: Tipo de vegetación afectados por incendios forestales en los Andes peruanos (por encima de los 2000 msnm)	17
Figura 8: Promedio mensual de ocurrencia de incendios en un año normal (a), y un año extremo (b)	18
Figura 9: Focos de calor en el Perú entre julio y diciembre, periodo 2012 – 2016.....	19
Figura 10: Climatología de las precipitaciones (sombras), vientos a 925 hPa (vectores) y vientos a 300 hPa (líneas), durante el mes de enero (a, c) y julio (a, b).....	20
Figura 11: Sección transversal esquemática que muestra los principales elementos del monzón sudamericano	21
Figura 12: a) Mapa de regiones climáticas del Perú. b) Climatología de precipitación mensual del periodo 1998 – 2014 (mm/mes)	23
Figura 13: Régimen temporal de lluvias en la cuenca Andino-Amazónico en 8 estaciones, para el periodo 1975 – 2003	24
Figura 14: Espectro electromagnético y región de la luz visible.....	32
Figura 15: Firmas espectrales típicas de distintas cubiertas	33
Figura 16: a) Satélite EOS-AM (Terra). b) Satélite EOS-PM (Aqua).....	35
Figura 17: Esquema del escaneo que realiza el sensor MODIS a bordo del satélite Terra y Aqua	36
Figura 18: Elementos básicos de un SIG.....	41
Figura 19: Almacenamiento de datos SIG.....	43
Figura 20: Capas de información geográfica dentro de un SIG	43
Figura 21: a) Etapas básicas en el proceso relacional de software sig. b) Arquitectura clásicas de software SIG	44

Figura 22: Flujo de trabajo de un lenguaje de programación R	46
Figura 23: Representación de algunos gráficos que pueden realizarse desde el lenguaje R	47
Figura 24: Descripción esquemática del desarrollo de PISCOpV2.1	51
Figura 25: Precipitación y temperatura máxima mensual promedio en Cajamarca (a) y Cusco (b)	71
Figura 26: Registro histórico de incendios en Cajamarca (a) y Cusco (b)	72
Figura 27: Incendios forestales presentados por ecosistema entre 2002-2016 para Cajamarca (a) y Cusco (b)	74
Figura 28: Incendios forestales presentados por tipo de cobertura natural entre 2002-2016 para Cajamarca (a) y Cusco (b)	75
Figura 29: El Diagrama de Cajas de la evolución mensual de los incendios forestales a lo largo de intervalos altitudinales por tipo de vegetación en Cajamarca (a) y Cusco (b)	76
Figura 30: (a) Distribución espacial de incendios sobre la región andina (> 1500 msnm) por ecosistema y (b) comportamiento estacional (meses 1-12) de incendios forestales acumulados totales en años normales y extremos (2005 y 2016) para la región Cajamarca	78
Figura 31: (a) Distribución espacial de incendios sobre la región andina (> 1500 msnm) por ecosistema y (b) comportamiento estacional (meses 1-12) de incendios forestales acumulados totales en años normales y extremos (2005 y 2010) para la región Cusco.....	78
Figura 32: Caracterización espacial de sequías (a) y porcentaje de área afectada por las sequías (b) con base en el SPI3 (julio-setiembre) y SPI6 (abril-setiembre) en la región andina de Cajamarca durante los años de eventos extremos en la cuenca amazónica (2005, 2010 y 2016).....	81
Figura 33: Caracterización espacial de sequías (a) y porcentaje de área afectada por las sequías (b) con base en el SPI3 (julio-setiembre) y SPI6 (abril-setiembre) en la región andina de Cusco durante los años de eventos extremos en la cuenca amazónica (2005, 2010 y 2016)	81
Figura 34: Distribución espacial de anomalías estandarizadas de NDVI (a) y porcentaje de área afectada por estas (b) en la región andina de Cajamarca durante los años de sequía en la cuenca Amazónica 2005, 2010 y 2016	85
Figura 35: Distribución espacial de anomalías estandarizadas de NDVI (a) y porcentaje de área afectada por estas (b) en la región andina de Cusco durante los años de sequía en la cuenca Amazónica 2005, 2010 y 2016.....	86

Figura 36: Valores mensuales promedio del índice espectral NDVI para pastizales andinos, matorrales andinos y bosques naturales en Cajamarca (a,b y c, respectivamente) y Cusco (d,e y f, respectivamente) en los años de sequía extrema (2005, 2010 y 2016)	90
Figura 37: Correlaciones entre el NDVI y el SPI3, SPI6 y SPI9 (con desfase de un mes) para pastizales andinos, matorrales andinos y bosques naturales en Cajamarca (a, b y c, respectivamente) y Cusco (d, e y f, respectivamente)	93
Figura 38: Estacionalidad por altitud de la precipitación en las regiones de a) Cajamarca y b) Cusco.....	95
Figura 39: Estacionalidad por altitud de la temperatura máxima en a) Cajamarca y b) Cusco	95
Figura 40: Precipitación acumulada (mm) y temperatura máxima promedio (°C) durante la temporada de estiaje (mayo-setiembre) en a) Cajamarca y b) Cusco (en gris se señalan los años donde se registraron mayor número de incendios).....	97
Figura 41: Diagrama de cajas de precipitación diaria (enero-diciembre) y umbrales que definen los días calurosos, establecidos por el decil 1 (triángulos y números rojos) para pastizales andinos, matorrales andinos y bosques naturales en Cajamarca (a,b y c, respectivamente) y Cusco (d,e y f, respectivamente)	99
Figura 42: Diagrama de cajas de temperatura máxima diaria (enero-diciembre) y umbrales que definen los días calurosos, establecidos por el decil 9 (triángulos y números rojos) para pastizales andinos, matorrales andinos y bosques naturales en Cajamarca (a,b y c, respectivamente) y Cusco (d,e y f, respectivamente)	100
Figura 43: Evolución de la precipitación acumulada (PA) para el período 2002-2016 (región gris) y durante los años de sequía extrema 2005, 2010 y 2016, para pastizales andinos, matorrales andinos y bosques naturales en Cajamarca (a, b y c, respectivamente) y Cusco (d, e y f, respectivamente). La línea blanca representa el promedio del parámetro en años normales	102
Figura 44: Evolución de la frecuencia acumulada de días secos (DDF) para el período 2002-2016 (región gris) y durante los años de sequía extrema 2005, 2010 y 2016, para pastizales andinos, matorrales andinos y bosques naturales en Cajamarca (a, b y c, respectivamente) y Cusco (d, e y f, respectivamente). La línea blanca representa el promedio del parámetro en años normales	104
Figura 45: Evolución de la frecuencia acumulada de días calurosos para el período 2002-2016 (región gris) y durante los años de sequía extrema 2005, 2010 y 2016, para pastizales andinos, matorrales andinos y bosques naturales en Cajamarca (a,b y c, respectivamente) y	

Cusco (d,e y f, respectivamente). La línea blanca representa el promedio del parámetro en años normales	106
Figura 46: Diagrama de cajas de la distribución mensual de la precipitación acumulada (PA) para el período 2002-2016, para pastizales andinos, matorrales andinos y bosques naturales en Cajamarca (a,b y c, respectivamente) y Cusco (d,e y f, respectivamente). Se resaltan los años de sequía extrema 2005 (puntos rojos), 2010 (puntos azules) y 2016 (puntos verdes), además de la media mensual (cruz roja).....	109
Figura 47: Diagrama de cajas de la distribución mensual de la frecuencia de días secos (DDF) para el período 2002-2016, para pastizales andinos, matorrales andinos y bosques naturales en Cajamarca (a,b y c, respectivamente) y Cusco (d,e y f, respectivamente). Se resaltan los años de sequía extrema 2005 (puntos rojos), 2010 (puntos azules) y 2016 (puntos verdes), además de la media mensual (cruz roja).....	110
Figura 48: Diagrama de cajas de la distribución mensual de la frecuencia de días calurosos (HDF) para el período 2002-2016, para pastizales andinos, matorrales andinos y bosques naturales en Cajamarca (a,b y c, respectivamente) y Cusco (d,e y f, respectivamente). Se resaltan los años de sequía extrema 2005 (puntos rojos), 2010 (puntos azules) y 2016 (puntos verdes), además de la media mensual (cruz roja).....	111
Figura 49: Matriz de correlaciones de frecuencia acumulada de incendios (CFF), variables climáticas: precipitación (P) y temperatura máxima (TX), parámetros climáticos: precipitación acumulada (PA), frecuencia de días secos (DDF) y frecuencia de días calurosos (HDF), y los índices espectrales (NDVI, EVI, SAVI, GEMI, NDWI, NDII, GVMi y VARI), obtenidos entre sí para el periodo agosto-noviembre para la vegetación de pastizales andinos en la región Cajamarca	114
Figura 50: Matriz de correlaciones de frecuencia acumulada de incendios (CFF), variables climáticas: precipitación (P) y temperatura máxima (TX), parámetros climáticos: precipitación acumulada (PA), frecuencia de días secos (DDF) y frecuencia de días calurosos (HDF), y los índices espectrales (NDVI, EVI, SAVI, GEMI, NDWI, NDII, GVMi y VARI), obtenidos entre sí para el periodo agosto-noviembre para la vegetación de matorrales andinos en la región Cajamarca.....	115
Figura 51: Matriz de correlaciones de frecuencia acumulada de incendios (CFF), variables climáticas: precipitación (P) y temperatura máxima (TX), parámetros climáticos: precipitación acumulada (PA), frecuencia de días secos (DDF) y frecuencia de días calurosos (HDF), y los índices espectrales (NDVI, EVI, SAVI, GEMI, NDWI, NDII, GVMi y VARI),	

obtenidos entre sí para el periodo agosto-noviembre para la vegetación de bosques naturales en la región Cajamarca	116
Figura 52: Matriz de correlaciones de frecuencia acumulada de incendios (CFF), variables climáticas: precipitación (P) y temperatura máxima (TX), parámetros climáticos: precipitación acumulada (PA), frecuencia de días secos (DDF) y frecuencia de días calurosos (HDF), y los índices espectrales (NDVI, EVI, SAVI, GEMI, NDWI, NDII, GVMÍ y VARI), obtenidos entre sí para el periodo agosto-noviembre para la vegetación de pastizales andinos en la región Cajamarca	118
Figura 53: Matriz de correlaciones de frecuencia acumulada de incendios (CFF), variables climáticas: precipitación (P) y temperatura máxima (TX), parámetros climáticos: precipitación acumulada (PA), frecuencia de días secos (DDF) y frecuencia de días calurosos (HDF), y los índices espectrales (NDVI, EVI, SAVI, GEMI, NDWI, NDII, GVMÍ y VARI), obtenidos entre sí para el periodo agosto-noviembre para la vegetación de matorrales andinos en la región Cajamarca.....	119
Figura 54: Matriz de correlaciones de frecuencia acumulada de incendios (CFF), variables climáticas: precipitación (P) y temperatura máxima (TX), parámetros climáticos: precipitación acumulada (PA), frecuencia de días secos (DDF) y frecuencia de días calurosos (HDF), y los índices espectrales (NDVI, EVI, SAVI, GEMI, NDWI, NDII, GVMÍ y VARI), obtenidos entre sí para el periodo agosto-noviembre para la vegetación de bosques naturales en la región Cajamarca	120
Figura 55: Matriz de correlaciones de variables climáticas: precipitación (P) y temperatura máxima (TX), parámetros climáticos: precipitación acumulada (PA), frecuencia de días secos (DDF) y frecuencia de días calurosos (HDF), y los índices espectrales (NDVI, EVI, SAVI, GEMI, NDWI, NDII, GVMÍ y VARI), obtenidos entre sí para el periodo mayo-setiembre para la vegetación de pastizales andinos en la región Cajamarca.....	122
Figura 56: Matriz de correlaciones de variables climáticas: precipitación (P) y temperatura máxima (TX), parámetros climáticos: precipitación acumulada (PA), frecuencia de días secos (DDF) y frecuencia de días calurosos (HDF), y los índices espectrales (NDVI, EVI, SAVI, GEMI, NDWI, NDII, GVMÍ y VARI), obtenidos entre sí para el periodo mayo-setiembre para la vegetación de matorrales andinos en la región Cajamarca	123
Figura 57: Matriz de correlaciones de variables climáticas: precipitación (P) y temperatura máxima (TX), parámetros climáticos: precipitación acumulada (PA), frecuencia de días secos (DDF) y frecuencia de días calurosos (HDF), y los índices espectrales (NDVI,	

EVI, SAVI, GEMI, NDWI, NDII, GVMI y VARI), obtenidos entre sí para el periodo mayo-setiembre para la vegetación de bosques naturales en la región Cajamarca	124
Figura 58: Matriz de correlaciones de variables climáticas: precipitación (P) y temperatura máxima (TX), parámetros climáticos: precipitación acumulada (PA), frecuencia de días secos (DDF) y frecuencia de días calurosos (HDF), y los índices espectrales (NDVI, EVI, SAVI, GEMI, NDWI, NDII, GVMI y VARI), obtenidos entre sí para el periodo mayo-setiembre para la vegetación de pastizales andinos en la región Cusco	126
Figura 59: Matriz de correlaciones de variables climáticas: precipitación (P) y temperatura máxima (TX), parámetros climáticos: precipitación acumulada (PA), frecuencia de días secos (DDF) y frecuencia de días calurosos (HDF), y los índices espectrales (NDVI, EVI, SAVI, GEMI, NDWI, NDII, GVMI y VARI), obtenidos entre sí para el periodo mayo-setiembre para la vegetación de matorrales andinos en la región Cusco.....	127
Figura 60: Matriz de correlaciones de variables climáticas: precipitación (P) y temperatura máxima (TX), parámetros climáticos: precipitación acumulada (PA), frecuencia de días secos (DDF) y frecuencia de días calurosos (HDF), y los índices espectrales (NDVI, EVI, SAVI, GEMI, NDWI, NDII, GVMI y VARI), obtenidos entre sí para el periodo mayo-setiembre para la vegetación de bosques naturales en la región Cusco.....	128
Figura 61: Frecuencia acumulada de incendios forestales (CFF) y el índice espectral VARI (Cajamarca) y GVMI (Cusco), para periodos con ocurrencia promedio y de alta ocurrencia sobre pastizales andinos, matorrales andinos y bosques naturales en Cajamarca (a,b y c, respectivamente) y Cusco (d,e y f, respectivamente)	130

ÍNDICE DE ANEXOS

Anexo 1: Script en lenguaje de programación R para la clasificación de incendios forestales por tipo de ecosistema	158
Anexo 2: Script en lenguaje de programación R para calcular el promedio mensual de índices de vegetación por tipo de ecosistema.....	159
Anexo 3: Script en lenguaje de programación R para la extracción de índices vegetativos cada 8 días por tipo de vegetación.....	160
Anexo 4: Script en lenguaje de programación R para la extracción de precipitación y temperatura máxima por tipo de ecosistema	161
Anexo 5: Script en lenguaje de programación R para el cálculo de deciles de precipitación y temperatura máxima por tipo de vegetación.....	163

RESUMEN

En las últimas décadas, el registro de la ocurrencia de incendios forestales sobre los ecosistemas naturales se ha incrementado en regiones de los Andes peruanos. No obstante, investigaciones sobre el ambiente favorable al desarrollo de estos eventos, son escasos. Este estudio caracteriza las condiciones climáticas y vegetativas sobre los pastizales andinos, matorrales andinos y bosques naturales de Cajamarca y Cusco, regiones mayormente afectadas por estos eventos durante el periodo 2002-2016. Las variables climáticas de precipitación y temperatura máxima se analizaron utilizando el producto PISCO del SENAMHI. La vegetación se caracterizó a partir de índices de vegetación, para los cuales se utilizaron datos de reflectividad MOD09A1 del sensor MODIS. Se ha identificado que los bajos niveles de humedad y las altas temperaturas propias de las sequías que se presentaron en regiones de la cuenca andina-amazónica, relacionadas a anomalías positivas de temperatura superficial del mar en el Pacífico (durante eventos El Niño) y el Atlántico durante el 2005, 2010 y 2016, tuvieron un alcance en las regiones evaluadas, generando un ambiente favorable para se produzca un incremento severo de incendios forestales. El análisis de la precipitación acumulada, frecuencia de días secos y la frecuencia de días calurosos indican que estos se relacionarían mejor con el desarrollo de los incendios forestales durante el periodo de estiaje e inicio de la temporada de lluvias. A su vez, se identifican umbrales para los índices de vegetación VARI (para Cajamarca) y GVMI (para Cusco) que definen las condiciones vegetativas potenciales para el incremento de incendios forestales en un año normal y con alta ocurrencia. El monitoreo de estos factores climáticos y vegetativos contribuirían a establecer estrategias que conduzcan a la reducción de los impactos negativos que tienen los incendios forestales sobre los ecosistemas altoandinos, los regímenes hidrológicos y la disponibilidad hídrica en el país.

Palabras clave: Incendios forestales, días secos, días calurosos, MODIS, sequía, pastizales andinos, matorrales andinos, bosques naturales

ABSTRACT

In recent decades, the record of the occurrence of forest fires on natural ecosystems has increased in regions of the Peruvian Andes. However, research on the environment favorable to the development of these events is scarce. This study characterizes the climatic and vegetative conditions on the Andean grasslands, Andean scrublands and natural forests of Cajamarca and Cusco, regions mostly affected by these events during the 2002-2016 period. The climatic variables of precipitation and maximum temperature were analyzed using the PISCO product from SENAMHI. Vegetation was characterized from vegetation indices, for which MOD09A1 reflectivity data from the MODIS sensor were used. It has been identified that the low humidity levels and the high temperatures typical of the droughts that occurred in regions of the Andean-Amazon basin, related to positive anomalies of sea surface temperature in the Pacific (during El Niño events) and the Atlantic During 2005, 2010 and 2016, they reached the evaluated regions, generating a favorable environment for a severe increase in forest fires. The analysis of accumulated precipitation, frequency of dry days and the frequency of hot days indicate that these would be better related to the development of forest fires during the dry period and the beginning of the rainy season. In turn, thresholds are identified for the vegetation indices VARI (for Cajamarca) and GVMÍ (for Cusco) that define the potential vegetative conditions for the increase of forest fires in a normal year with high occurrence. The monitoring of these climatic and vegetative factors would contribute to establishing strategies that lead to the reduction of the negative impacts that forest fires have on high Andean ecosystems, hydrological regimes and water availability in the country.

Keywords: Forest fires, dry days, hot days, MODIS, drought, andean grasslands, andean shrublands, natural forests.

I. INTRODUCCIÓN

1.1 Justificación de la investigación

Los reportes de emergencias de incendios forestales en el Perú, según el Instituto Nacional de Defensa Civil –INDECI, se han incrementado alrededor del 96 % de incidencia desde 2002 (INDECI, 2013). Hasta el mes de agosto del 2019, INDECI informa que los incendios han destruido alrededor de 500 Ha de cobertura vegetal entre las regiones de Ancash, Cusco, Apurímac, Ayacucho y Junín, Moquegua. (El Comercio, 2019). No obstante, el Perú no está preparado adecuadamente para afrontar los incendios forestales que vienen impactando en varias regiones del país (Cusco, Lambayeque, Puno, Cajamarca) (RPP, 2016), al no tener una unidad especializada responsable en respuesta ante emergencias por incendios forestales.

Los impactos ocasionados por los incendios forestales se encuentran en función a la intensidad, frecuencia y duración en el que se presenten, estos pueden alcanzar daños complejos en los ecosistemas debido a las diferencias que presentan en su estructura a lo largo de todo el territorio (Gonzales, 2017; Manta, 2017). Al presentarse un incendio, el suelo será afectado en sus propiedades (químicas, físicas y biológicas), se reducirán los niveles de productividad (García et al., 2017, Mataix et al., 2011 y Shakesby, 2011) y al perder la cobertura vegetal, el suelo queda expuesto a ser erosionado por el agua y el viento y por lo tanto a pérdida de nutrientes (Caon et. al, 2014 y Shakesby, 2011). El impacto en el ciclo hidrológico dentro de la cuenca ante la pérdida de la vegetación y el suelo, provocado por los incendios, conllevaría a un aumento de la escorrentía superficial y disminución de la infiltración (Lloret et al., 2009). Las partículas de carbón que se generan durante los incendios forestales en regiones de alta montaña pueden depositarse en la superficie de los glaciares, contribuyendo que estos absorban mayor cantidad de energía solar, principalmente en los meses de estiaje. (Sánchez et al., 2018). Por ello, la cuantificación de los efectos e interacciones de factores naturales y antropogénicos (clima, vegetación, el uso de la tierra y

las condiciones de manejo, sobre la quema de vegetación) deben ser establecidas (Ying et al., 2018).

Se espera que los resultados de este trabajo puedan contribuir a generar herramientas de prevención que conduzcan a diseñar o implementar estrategias de prevención ante la ocurrencia de incendios forestales, que finalmente aporten a la planificación y toma de decisiones integradas para reducir sus impactos en los Andes del Perú.

1.2 Problemática de los incendios forestales en el Perú y el Mundo

El uso del fuego en la agricultura en los últimos 100 años ha disminuido, principalmente en los países industrializados, no obstante, se vienen registrando incrementos de incendios forestales en varias regiones del mundo. En los países que no han alcanzado un desarrollo de la industria, se utiliza ampliamente el fuego para potenciar o reducir la vegetación debido al bajo coste que significa. Se estima que anualmente en el mundo se queman entre 10 a 15 millones de Ha de bosques boreales y zonas templadas, de 20 a 40 millones de Ha de bosques tropicales, de 500 a 1000 millones de Ha de bosques claros y sabanas, entre tropicales como subtropicales. De estas superficies quemadas, algunas se encuentran aparentemente adaptadas a la presencia del fuego, sin embargo, en aquellas que no lo están, se pueden generar problemas como degradación de la vegetación, pérdida de fauna, erosión de los suelos, contaminación de las aguas, contaminación de la atmósfera y conflictos socioeconómicos (Castillo et al., 2003; Arnaldos et al., 2004; FAO, 2012).

Manta y Alarcón (2008) trabajaron un inventario de incendios forestales en el Perú para un periodo de 32 años (1973 a 2005), en el que se estima que anualmente se vieron afectadas 8 614 523 Ha. Las superficies afectadas por quemas agropecuarias alcanzaron las 182 261 Ha en la Costa y Sierra, mientras que en la Selva fue de aproximadamente 8 millones de Ha. Se consideran como incendios forestales al fuego descontrolado producto de las quemas agropecuarias, en el cual se ven afectadas la vegetación que se desarrolla en suelos forestales o de protección (SERFOR, 2018; MINAM, 2017).

Más del 90 % de la ocurrencia de incendios forestales en el Perú, se deben a causas antrópicas relacionados a actividades de habilitación de áreas de cultivos y quema de pastos (Manta Alarcón, 2008)). Solo entre el 2012 y 2016 se han registrado 187 600 Ha de cobertura natural que fueron afectados por incendios forestales, de los cuales 94 239 Ha han quedado totalmente degradadas. Los departamentos donde más eventos se han reportado, entre el

2012 y el 2016, se encuentran en la región Andina, siendo los departamentos de Cusco, Cajamarca, Apurímac y Puno los más afectados (SERFOR, 2018; Zubieta et al., 2019).

Los incendios forestales en el Perú constituyen una de las principales amenazas para gran parte de los ecosistemas y su diversidad biológica, la cual se extiende a la misma población humana debido a que pueden disminuir la disponibilidad de agua dulce al cambiar los regímenes hidrológicos con la pérdida de los suelos forestales y la cobertura natural de los bosques (Manta, 2017). Esto se debe principalmente al grado de exposición en el que se encuentra el suelo después de la quema o deforestación.

1.3 Ciclo hidrológico e impacto de eventos de sequía

La hidrología es una ciencia que estudia las diferentes fases del agua en el planeta, abarca todas las ciencias hídricas y se relaciona con su distribución, circulación, sus propiedades físicas-químicas, y la relación que existe entre los seres vivos y el entorno donde se desarrollan. El foco central de la hidrología es el ciclo hidrológico, como tal, no tiene un principio ni un fin, pero sus diferentes procesos ocurren de forma continua (Chow, 1994).

El ciclo hidrológico se desarrolla en los tres estratos del planeta: i) la atmósfera (capa gaseosa), ii) la litósfera (capa sólida) y iii) la hidrósfera (capa líquida). La precipitación, escorrentía, evaporación y otras fases del ciclo son los componentes del sistema del ciclo (Figura 1). Una forma de analizar el sistema completo es a través de una agrupación de los componentes en subsistemas diferentes, que luego serán integradas de acuerdo a cómo interactúan entre ellas, y así se pueda generar un mejor entendimiento del ciclo hidrológico (Palomino, 2015).

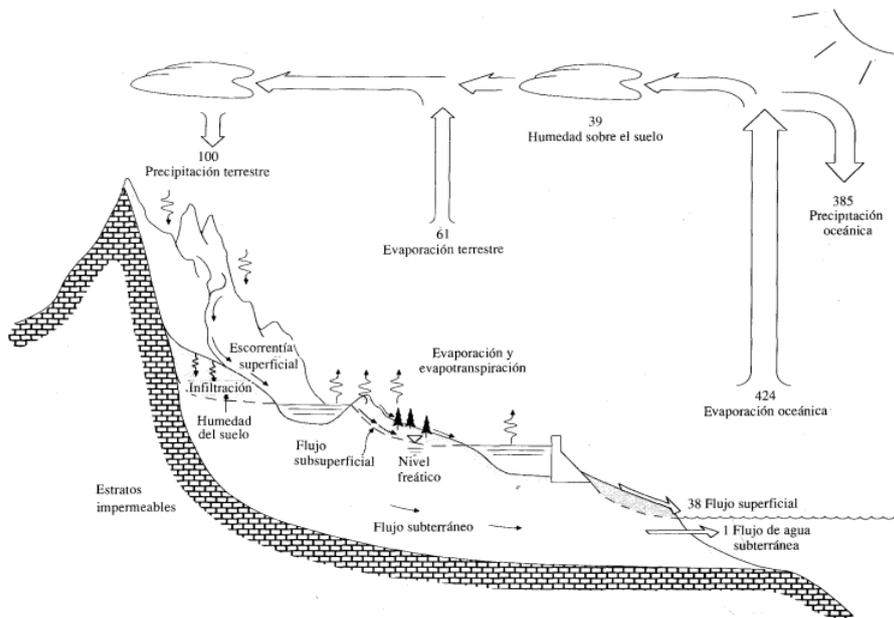


Figura 1: Esquema del balance hídrico promedio global anual del ciclo hidrológico, en unidades relativas a un valor 100 respecto a la tasa de precipitación terrestre

Fuente: Chow (1994)

Las sequías son eventos relativamente complejos, estas afectan de manera directa el desarrollo y aprovechamiento del recurso hídrico, alterando en ciclo hidrológico en una cuenca, manifestándose menores regímenes de lluvia, déficit de humedad en el suelo o reducción de caudales en los ríos. Las sequías son consideradas como fenómenos de escasez del recurso hídrico durante periodos prolongados; también se caracterizan por presentar un desarrollo temporal lento y una amplia cobertura espacial. Son capaces de provocar grandes perjuicios sobre los ecosistemas, la sociedad o los sistemas de producción (Fernandez, 1997), y contribuir severamente al incremento de la frecuencia de incendios (Zubieta et al., 2019). Las sequías pueden producirse cuando las precipitaciones disminuyen durante periodos de tiempo prolongados, generando un déficit en la disponibilidad del recurso hídrico en todos los estados del ciclo hidrológico. Sus efectos pueden intensificarse en función a la cantidad de evaporación (relacionado a la radiación solar, el viento, la temperatura, etc.), las propiedades del suelo y las características de la cobertura vegetal (Kundzewicz et al., 1993).

Algunas investigaciones han demostrado cómo las sequías extremas alteran el crecimiento de algunas especies vegetales, llegando incluso a morir si el evento se prolonga (Nepstad et al., 2007; Brando et al., 2008). Sin embargo, los procesos que involucran la relación

vegetación-lluvia son complejos y no lineales, por lo que su representación mediante modelos aún es complicada (Scheffer et al., 2005; Van nes et al., 2014). Estudios mediante percepción remota indican que las sequías extremas presentadas en los últimos años, sugieren un aumento de la pérdida de los bosques a causa de los incendios forestales que reportan tasas de incremento del 400 % en comparación a lo registrado en años normales (Gutierrez, 2018; Zubieta et al., 2019).

1.4 Área de estudio

Las condiciones antrópicas, climáticas y vegetativas asociadas a la ocurrencia de incendios pueden contrastarse a lo largo de los Andes peruanos, no obstante, se ha priorizado en este trabajo las regiones de Cusco y Cajamarca, debido a que son las regiones con mayor ocurrencia de incendios (MINAM 2018, Zubieta et al., 2019). Asimismo, brindará ventajas para establecer una comparación sobre los factores de diferenciación climática e impactos en la vegetación entre la región norte y sur del Perú, debido a la fuerte variabilidad de las lluvias que ejerce la cordillera Andina en el país (Espinoza et al., 2009).

1.4.1 Ubicación geográfica

El área de estudio comprende los departamentos de Cajamarca y Cusco (Figura 2). Cajamarca está constituido por 13 provincias y 127 distritos, alcanza una extensión de 32 962 km² desde 77.75°O - 79.45°O y 4.64°S - 7.75°S. Limita por el sur con el departamento de La Libertad, por el norte con el estado de Ecuador, por el este con Amazonas y el oeste con Lambayeque. Por otro lado, el departamento de Cusco está constituido por 13 provincias y 108 distritos, abarca un área de 72 104 km² que se extiende desde 70.37°O - 73 94°O y 11.22°S - 15.46°S. limita con los departamentos de Junín y Ucayali por el norte, Puno y Madre de Dios por el este, Arequipa por el sureste y Ayacucho por el oeste. Cajamarca y Cusco se encuentran ubicados dentro de la cuenca Amazónica con altitudes que van desde los 400 hasta 3550 msnm y desde los 532 hasta 4800 msnm, respectivamente. Ambas regiones presentan un relieve accidentado debido a que sus territorios son atravesados de norte a sur por la cordillera de los Andes. En Cajamarca, según el mapa nacional de ecosistemas (MINAM, 2019a), los ecosistemas andinos predominantes son los matorrales y las jalcas, mientras que en Cusco son los matorrales y los pajonales de puna húmeda. En este trabajo, congruente a lo indicado en otros estudios (Zulkafli et al., 2014; Zubieta et al, 2017, Zubieta et al., 2019), se ha considerado la cota 1500 msnm como

la cota divisoria de los Andes, debido a que una gran densidad de incendios se ha ido registrando en las últimas décadas en esta región.

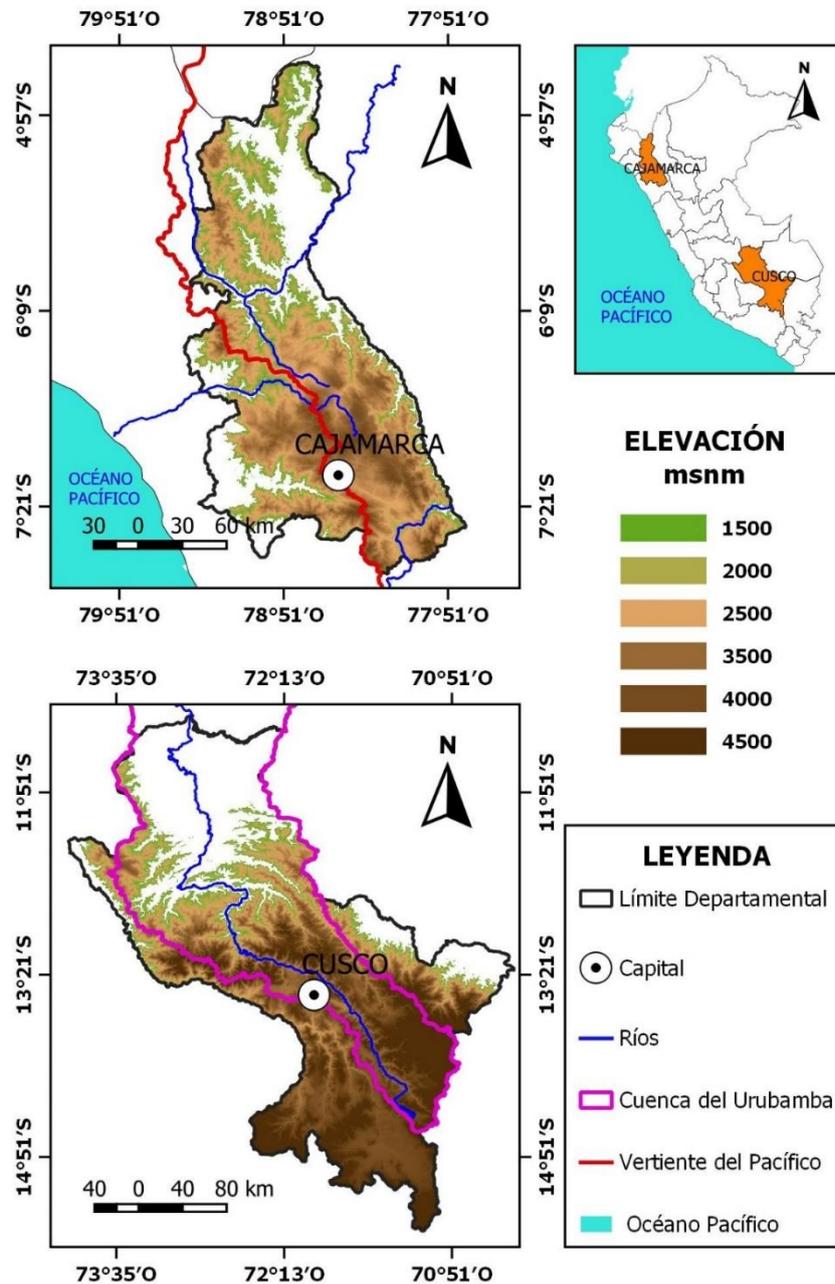


Figura 2: Área de estudio correspondiente a las regiones Cajamarca y Cusco

1.4.2 Escenario físico biológico

Cajamarca presenta un clima que varía entre seco, templado y cálido durante el día y frío durante las noches, con temperaturas que oscilan entre los 23 °C próximos a la costa, 28 °C en ceja de selva y hasta 4 °C en la sierra, con precipitaciones de 200 hasta 1500 mm durante el periodo de lluvias (SENAMHI, 2017a). Por lo general, las temperaturas mínimas y

máximas no tienen gran variación durante todo el año. Durante las noches claras el enfriamiento es más fuerte, principalmente durante los meses secos, donde la incidencia de heladas aumenta. La región Andina de Cajamarca es semiárida y a partir de esta región se distingue los Andes húmedos de Ecuador y Colombia, y los Andes secos del sur (ONERN, 1977). Presenta dos estaciones marcadas: una con altas precipitaciones (verano) entre diciembre a marzo, y otra seca desde abril a noviembre (invierno); sin embargo, estos ciclos presentan etapas excepcionales cuando se presenta un evento de sequía o abundantes lluvias (Silva, 2012). Las precipitaciones comienzan en la parte septentrional del departamento, con tendencia a extenderse por la parte oriental, influenciadas por las condiciones atmosféricas cercanas a la zona ecuatorial (De la Cruz et. al, 1999).

El departamento de Cajamarca se encuentra dentro de algunas cuencas principales, las cuales pueden clasificarse en función a su vertiente (Figura 3): Vertiente del Pacífico, conformada por las cuencas Chicama, Zaña, Chaman, Motupe, Chancay-Lambayeque, Intercuenca 13773 y Jequetepeque, que en total cubren una superficie de 10 817 km², con un rendimiento hídrico aproximado de 3 687 MMC/año. La vertiente del Atlántico, constituido por las cuencas Chinchipe, Crisnejas, Chamaya, Cenepa, Alto Marañon I, Alto Marañon II, Alto Marañon III, Alto Marañon IV y Alto Marañon V, que suman un total de 22 620 km² y un aporte aproximado de 32 048 MMC/año, según el método de Becerril (Vasquez, 2009).

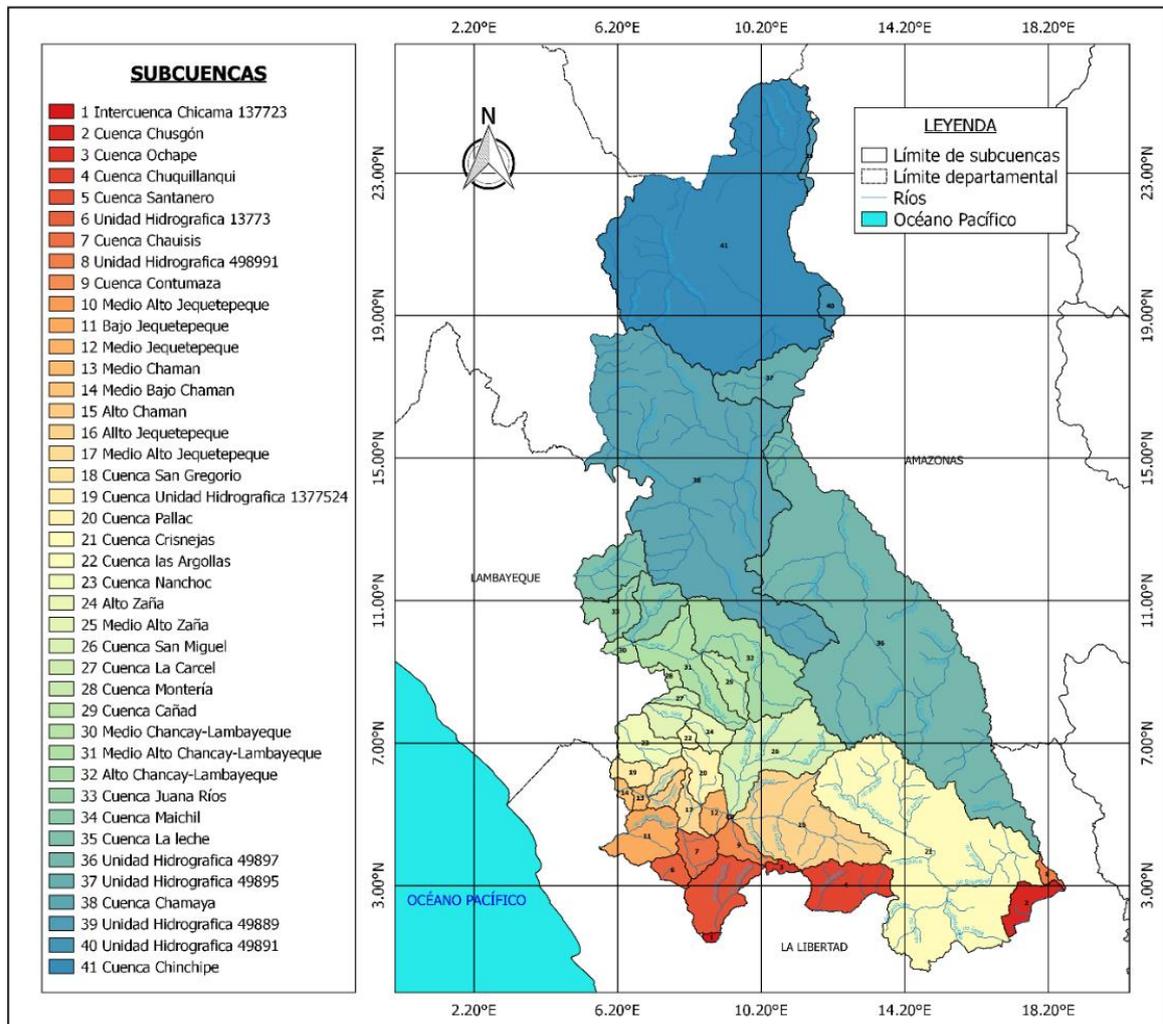


Figura 3: Mapa de subcuencas hidrográficas de la región Cajamarca

La diversidad de altitudes hace posible que se desarrollen diferentes tipos de clima y vegetación (Tabla 1). Por ejemplo, las cumbres que sobrepasan los 4500 msnm se distinguen por la ausencia de vegetación acompañada de bajas temperaturas. Las punas que se extienden entre los 3500 a 4500 msnm alcanzan temperaturas por debajo de los 0°C y se cubren por pastos naturales (ichu). Debajo de los 3500 msnm se empiezan a desarrollar las actividades agrícolas (Silva, 2012). La cobertura de vegetación arbustiva, vegetación escasa y afloramiento rocoso ocupa la mayor extensión con 15.73%, respecto al área departamental; le sigue la cobertura de bosques naturales con un 13.79% de toda la superficie; también es importante mencionar la cobertura de mosaico de cultivo, ya que ocupa un total de 10.01% del territorio regional (Alcántara, 2009).

Tabla 1: Superficie de los tipos de cobertura vegetal en el departamento de Cajamarca

Tipo de cobertura	Superficie	
Cuerpo de agua	1997.35 km ²	0.06 %
Tierras con áreas urbanas	6453.36 km ²	0.20 %
Tierras con bosques naturales	454267.86 km ²	13.79 %
Tierras con bosque seco	293135.25 km ²	8.90 %
Tierras con cultivos agrícolas	86648.89 km ²	2.63 %
Tierras con plantaciones forestales	17642.48 km ²	0.54 %
Mosaico de cultivos	329774.64 km ²	10.01 %
Tierras con pastos naturales	46402.91 km ²	1.41 %
Tierras degradadas	4514.27 km ²	0.14 %
Tierras con vegetación arbustiva	156847.59 km ²	4.76 %
Tierras con vegetación escasa y afloramientos rocosos	113118.78 km ²	3.43 %
Total	1510803.40 km²	45.85 %

Fuente: Alcántara (2009)

En Cusco el estudio de las variables climáticas ha permitido determinar una fuerte gradiente térmica vinculada a la variedad de climas como producto de la topografía, dando lugar a una diversidad y cambios abruptos de los ecosistemas asociados fundamentalmente a la Cordillera de los Andes (SENAMHI, 2012). Las condiciones geomorfológicas generan condiciones microclimáticas y mesoclimáticas con una gran variedad espacial y temporal. De acuerdo a la clasificación climática de Thornthwaite (1931) y del SENAMHI (1988), Cusco presenta 22 tipos de clima, donde predominan el clima semiseco y semifrío con invierno seco en 19.69%, de su superficie, lluvioso semicálido con precipitación abundante en todas las estaciones del año en 17.92% de la región, y lluvioso frío con invierno seco en 14.03% del total de la superficie del departamento.

La red hidrográfica de la región cusqueña (Figura 4) está conformada por tres cuencas interregionales principales, estas son: la cuenca del Urubamba-Vilcanota, Apurímac y Madre de Dios. En general, el régimen fluvial está fuertemente relacionado con la distribución estacional de las lluvias y los deshielos provenientes de los glaciares principales. La cuenca principal de la región es el Urubamba-Vilcanota, con una superficie en total de 58 735 km², de los cuales 43 370 km² (73.84 %) se encuentran dentro de la región Cusco. Atraviesa

diferentes pisos ecológicos, desde zonas nivales, puna, valles interandinos, ceja de selva, hasta la selva baja (ANA, 2010).

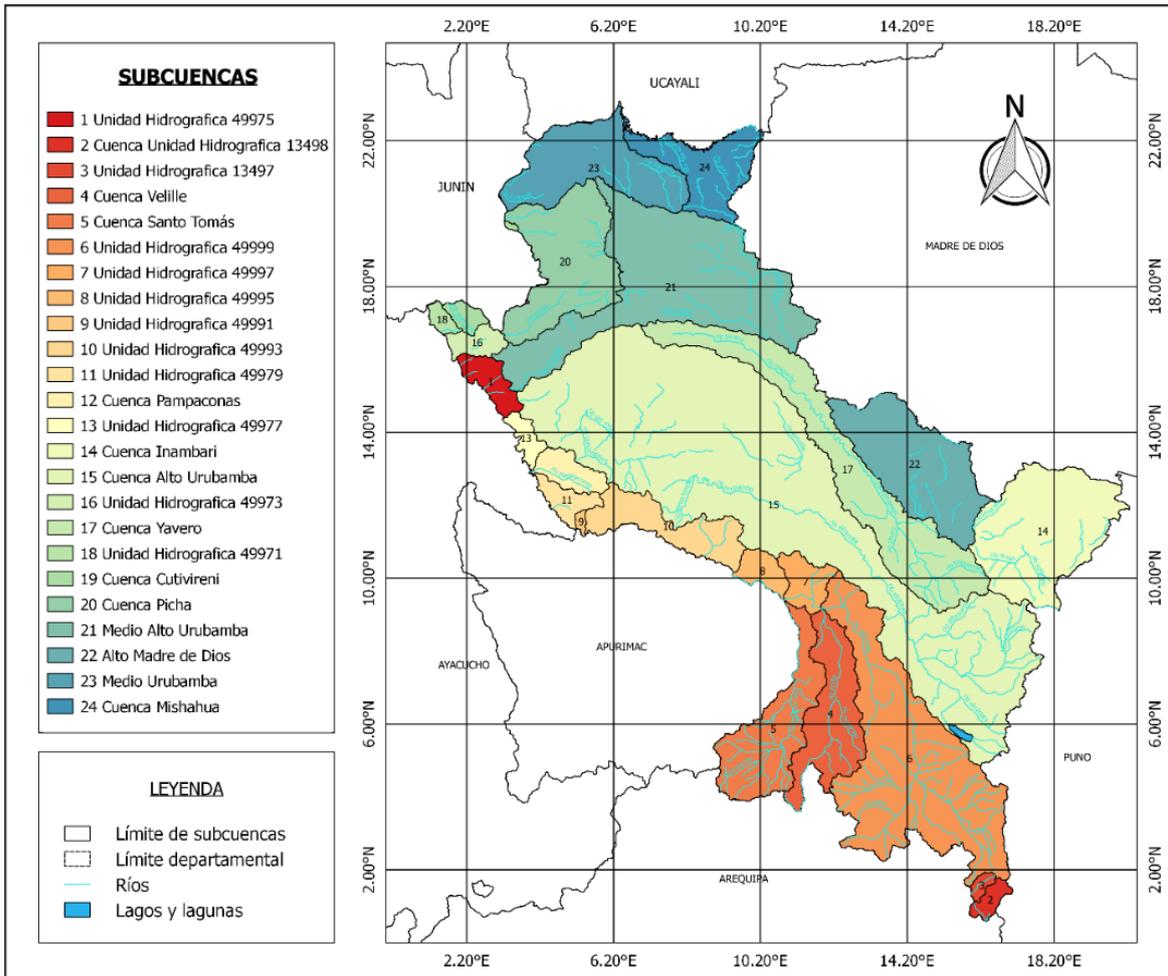


Figura 4: Mapa de subcuentas hidrográficas de la región Cusco

Debido a la ubicación fitogeográfica entre la región Andino y Amazónico del departamento del Cusco, la gran variedad fisiográfica, climática y edáfica; se pueden desarrollar una gran diversidad de formaciones vegetales (Tabla 2). Las unidades más importantes en la región son: el bosque húmedo montañoso que ocupa el 28.01% de la superficie, seguido por el pastizal y césped de puna, que representan el 24.66% y las áreas de intervención antrópica, que significan el 18.80% del territorio regional (INRENA, 2005).

Tabla 2: Descripción de las unidades de cobertura en la región Cusco

Tipo de cobertura	Superficie	
Áreas con intervención antrópica	14103.45 km ²	18.80 %
Áreas desnudas o con escasa vegetación	2836.92 km ²	3.78 %
Bosque húmedo de colinas	2567.91 km ²	3.42 %
Bosque húmedo de terraza aluvial	242.05 km ²	0.32 %
Bosque húmedo de terraza inundable	212.22 km ²	0.28 %
Bosque húmedo de tierra firme	241.28 km ²	0.32 %
Bosque húmedo de valles interandinos	165.94 km ²	0.22 %
Bosque húmedo montañoso	21006.66 km ²	28.00 %
Bosque seco de valles interandinos	205.11 km ²	0.27 %
Bosque macizos exóticos	51.93 km ²	0.07 %
Humedales andinos	1574.77 km ²	2.10 %
Matorral arbolado de valles interandinos	276.04 km ²	0.37 %
Matorral seco de valles interandinos	84.36 km ²	0.11 %
Matorral sub húmedo de valles interandinos	1350.17 km ²	1.80 %
Nevados	1211.41 km ²	1.61 %
Pacal puro	3826.10 km ²	5.10 %
Pacal mixto	2947.96 km ²	3.93 %
Pastizal y césped de puna	18487.45 km ²	24.65 %
Sabana tipo pluvifolia	332.84 km ²	0.44 %
Islas	79.57 km ²	0.11 %
Ríos	348.10 km ²	0.46 %
Lagos	2860.74 km ²	3.81 %
Total	75012.98 km²	100.00 %

Fuente: INRENA (1995)

1.4.3 Escenario socioeconómico

El departamento de Cajamarca contaba con una población de 1 341 012 habitantes, siendo así la quinta región más poblada del Perú, donde las provincias de Cajamarca, Jaén y Chota concentraban el 50.5% de la población regional (INEI, 2017). Según el género, la población masculina significa el 49.0%, mientras que la femenina representa el 51.0% del total. Presenta una tasa de crecimiento anual negativa de 0.2%. En la Tabla 3 se muestran las actividades económicas de la región, del cual se destaca la extracción de petróleo, gas y minerales, que representan el 20.6% del VAB del total, seguido de la agricultura, ganadería, caza y silvicultura con el 11.9% (BCRP, 2018).

Tabla 3: Valor Agregado Bruto 2017 (en miles de soles) de las actividades económicas en el departamento de Cajamarca

Actividades	VAB (S/)	Estructura (%)
Agricultura, ganadería, caza y silvicultura	1 291 446.00	11.90
Pesca y acuicultura	989.00	0.00
Extracción de petróleo, gas y minerales	2 246 682.00	20.60
Manufactura	690 001.00	6.30
Electricidad, gas y agua	181 591.00	1.70
Construcción	978 063.00	9.00
Comercio	1 006 157.00	9.20
Transporte, almacén, correo y mensajería	421 841.00	3.90
Alojamiento y restaurante	245 527.00	2.30
Telecom. y otros serv. de información	377 475.00	3.50
Administración pública y defensa	922 839.00	8.50
Otros servicios	251 418.00	23.20
Valor Agregado Bruto (S/)	10 884 029.00	

Fuente: INEI, 2017

El Instituto Nacional de Estadística e Informática indica que según el XII Censo Nacional de Población realizado en el 2017, en el departamento de Cusco la población alcanzó un total de 1 205 527 habitantes, donde las mujeres representaron el 50.5% y los hombres el 49.5%. Las provincias de Cusco, La Convención y Canchis concentran el 37.1%, 12.2% y 7.9% de la población, respectivamente. El crecimiento promedio de toda la región por año fue de 0.3%. Entre las más importantes actividades económicas (Tabla 4) se encuentran la extracción de petróleo, gas y minerales al representar el 48.2% del Valor Agregado Bruto (VAB) (BCRP, 2018).

Tabla 4: Valor Agregado Bruto 2017 (en miles de soles) de las actividades económicas en el departamento de Cusco

Actividades	VAB (S/)	Estructura (%)
Agricultura, ganadería, caza y silvicultura	994 446.00	4.60
Pesca y acuicultura	2 190.00	1.00
Extracción de petróleo, gas y minerales	10 397 420.00	48.20
Manufactura	1 104 008.00	5.10
Electricidad, gas y agua	261 069.00	1.20
Construcción	1 409 188.00	6.50
Comercio	1 541 962.00	7.10
Transporte, almacén, correo y mensajería	908 254.00	4.20
Alojamiento y restaurante	905 587.00	4.20
Telecom. y otros serv. de información	511 381.00	2.40
Administración pública y defensa	850 313.00	3.90
Otros servicios	2 693 708.00	12.50
Valor Agregado Bruto (S/)	2159526.00	

Fuente: INEI, 2017

Las actividades agrícolas de corta y quema para el establecimiento de los cultivos y pastos para el ganado ha llevado a niveles muy rápidos de deforestación en los Andes, ya que el uso del fuego es la práctica más común para realizar estos trabajos (Manta, 2004; SERFOR, 2018). Aún no se ha podido cuantificar las pérdidas socioeconómicas por los incendios forestales debido a que no existen estadísticas exactas y completas (Manta, 2017), sin embargo, la evaluación cualitativa de las pérdidas socioeconómicas que ocasionan estos eventos indica que se generan daños en pastos naturales en áreas ganaderas, pérdida de volúmenes de madera que provienen de bosques naturales, destrucción de equipos, maquinaria e instalaciones, contaminación del aire (genera infecciones respiratorias), colmatación de los cuerpos de agua, entre otros (Manta, 2004; Sabuco, 2013).

1.5 Objetivos

1.5.1 Objetivo general

Evaluar las variables meteorológicas y de vegetación durante eventos de sequías extremas para la determinación del riesgo potencial de ocurrencia de incendios forestales en regiones Andinas mediante el uso de datos provenientes de Teledetección.

1.5.2 Objetivos específicos

- Caracterizar la distribución espacial y temporal de la ocurrencia de incendios forestales en los Andes peruanos y priorizar las regiones potencialmente afectadas por estos eventos.
- Identificar los ecosistemas Andinos más afectados por problemas de incendios forestales.
- Determinar los patrones espaciales y temporales de precipitación, temperatura y vegetación asociados a la ocurrencia de incendios forestales en los Andes peruanos, mediante el uso de datos provenientes de sensores remotos.
- Analizar espacial y temporalmente los impactos de las sequías extremas sobre la precipitación, temperatura y vegetación en regiones Andinas y su relación con el incremento severo de incendios forestales.
- Proponer medidas que puedan aportar a la planificación y toma de decisiones integradas para reducir los impactos de los incendios forestales en los Andes del Perú.

II. REVISIÓN DE LITERATURA

2.1 Distribución espacial y ciclo anual de los incendios en el Perú

Según Zubieta et al. (2019), la distribución espacial de los incendios a nivel nacional, con base en la información provista por el MINAM, muestra una alta incidencia de incendios en regiones de alta montaña que se encuentran entre los 1500 y los 4000 msnm. Estos eventos se dan fundamentalmente en la vertiente oriental de los Andes, a comparación se presenta en la Costa o las regiones Amazónicas. Los departamentos donde se registra la mayor frecuencia de incendios forestales son Cusco, Cajamarca, Apurímac y Puno, seguido de La Libertad, Ayacucho, Piura y Huánuco (Figura 5).

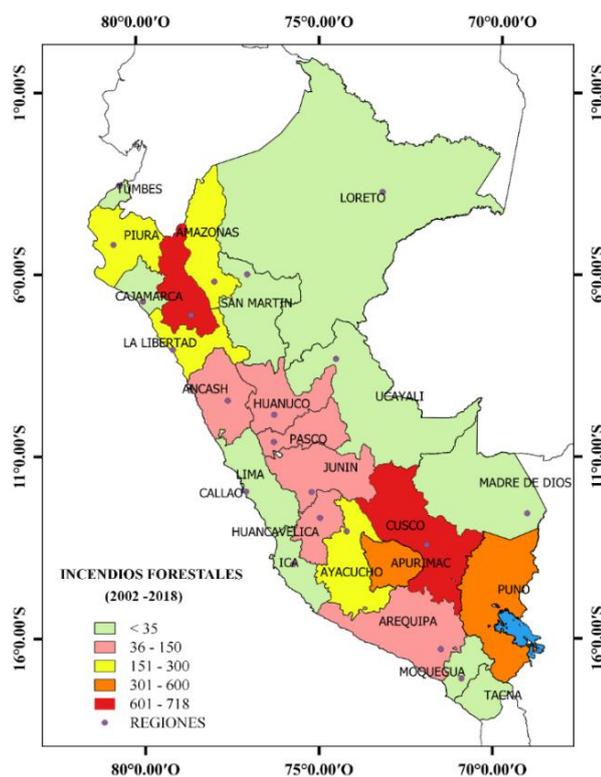


Figura 5: Mapa regional (político administrativo) de ocurrencia de incendios forestales

Fuente: Adaptado de Zubieta et al. (2019)

Manta y Kommeter (2018) indican que entre 1973 y 2014, se han registrado por lo menos 1574 incendios que causaron la pérdida y deterioro de 0.2 millones de Ha de vegetación natural en los Andes peruanos. El peligro de ocurrencia de incendios forestales en los departamentos Cusco, Apurimac y Arequipa es muy alto debido a que representan el 80% del área afectada por incendios en 42 años; les siguen los departamentos de Cajamarca y Piura con un peligro de clase alta, tal como se muestra en la Figura 6.

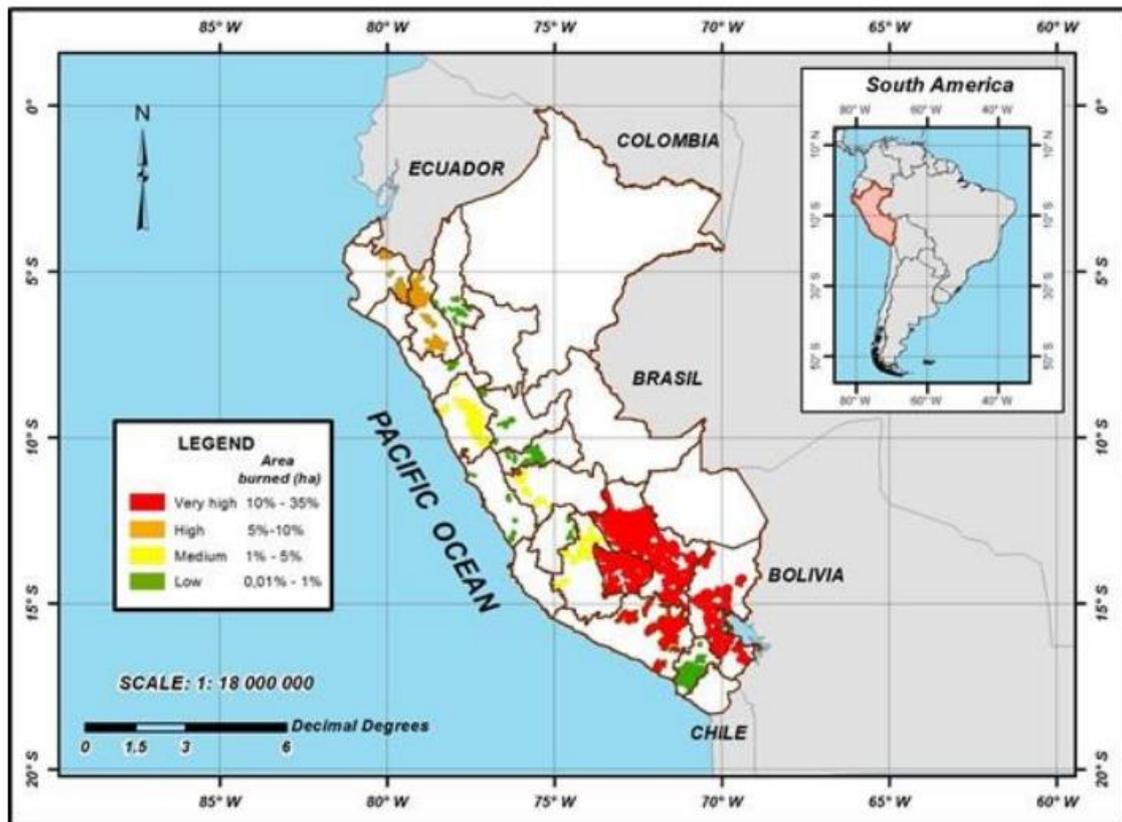


Figura 6: Mapa de peligro de incendios forestales para los Andes peruanos

Fuente: Manta et al. (2018)

El efecto del fuego en la vegetación altoandina ha dependido de su sensibilidad, recurrencia, duración y gravedad del siniestro. Los ecosistemas andinos más afectados por estos eventos son (Figura 7): la puna andina y el páramo (61%), bosques secos en valles interandinos, bosques secos de montaña y bosques nubosos montañosos tropicales (9%), matorrales andinos (1.4%), turberas tropicales (1.3%) y bosques plantados (0.8%)

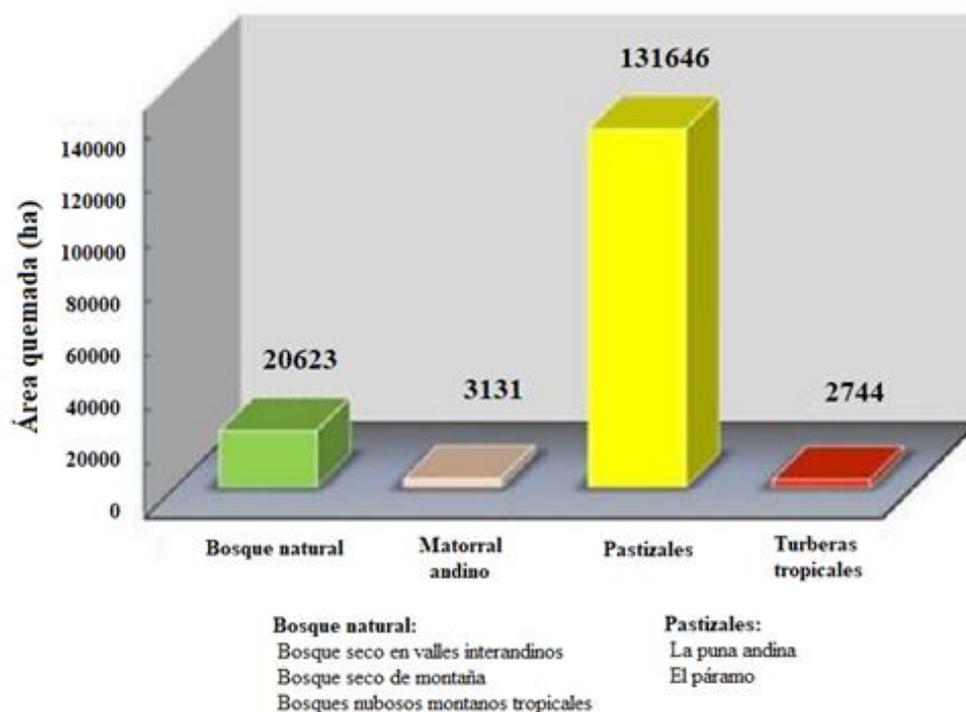


Figura 7: Tipo de vegetación afectados por incendios forestales en los Andes peruanos (por encima de los 2000 msnm)

Fuente: Manta et al. (2018)

De acuerdo a la información del Centro de Operaciones de Emergencia Nacional (COEN), entre el periodo 2012 - 2016 las regiones donde se reportaron más incendios forestales sobre zonas donde predominan pastizales altoandinos, fueron Cusco, Apurímac y Puno (SERFOR, 2018). En el año 2016, Cajamarca y Cusco fueron las regiones donde la pérdida de cobertura vegetal a causa de incendios fue mayor a comparación a otras regiones, alcanzando una afectación de 27 561 Ha y 16 355 Ha de vegetación natural, respectivamente.

El análisis cuantitativo de frecuencia de incendios forestales en la región Andina oriental muestra que estos eventos siguen un régimen estacional (Figura 8a y b), en un año normal (ocurrencia promedio) o un año extremo (ocurrencia con incremento severo), las cuales inician en la parte final del periodo de estiaje (agosto-setiembre) y se extienden hasta el inicio de la temporada de lluvias (noviembre), asociados a una variabilidad en el régimen de las lluvias o periodos de eventos extremos (Zubieta et al., 2019). Esta época del año se caracteriza por ser el inicio de la campaña agrícola en gran parte de los Andes peruanos, los cuales vienen acompañadas por actividades de quemas de pastizales y de rastrojos agrícolas,

los cuales se comportan como detonantes de los incendios forestales debido a las condiciones vegetativas y climáticas propias de la temporada de estiaje (Manta, 2017).

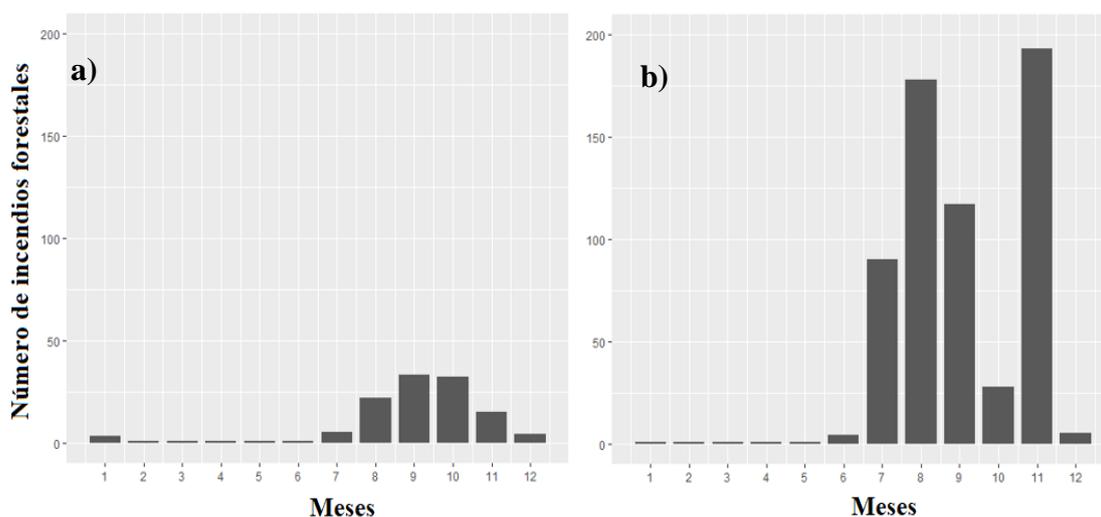


Figura 8: Promedio mensual de ocurrencia de incendios en un año normal (a), y un año extremo (b)

Fuente: Adaptado de Zubieta et al. (2019)

Existe una fuerte relación entre la incidencia de incendios con las prácticas agropecuarias que delinean el régimen de utilización del fuego de acuerdo a las necesidades de la población (SERFOR, 2018). El monitoreo de estas actividades por medio de imágenes satelitales, a través de focos de calor (anomalía termal que detecta un satélite) (Figura 9), muestran que existe un incremento acumulativo de estos eventos entre los meses de julio a noviembre (meses de estiaje), principalmente en el mes de setiembre, lo que se asocia de manera directa con la ausencia de precipitaciones.

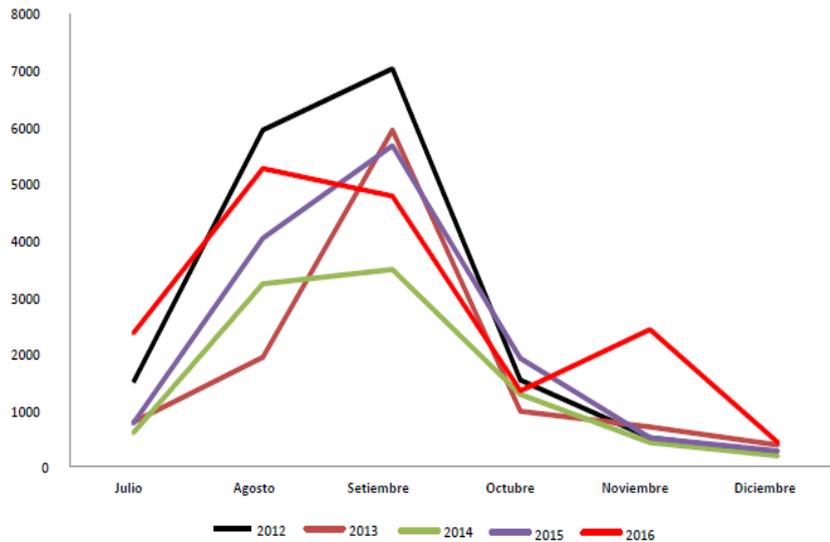


Figura 9: Focos de calor en el Perú entre julio y diciembre, periodo 2012 – 2016

Fuente: SERFOR (2018)

2.2 Circulación atmosférica en la región andino-amazónica del Perú

Los Andes es la cadena de montañas más extensa del mundo y la más importante del hemisferio Sur. Abarca una extensión que va desde los 10°N, hasta los 35°S y representa una colosal barrera para la circulación atmosférica, el cual se manifiesta con el desarrollo de distintos fenómenos atmosféricos y una marcada diferencia de las condiciones climáticas a lo largo de su flanco oriental y occidental (Garreaud, 2009).

El clima que se presenta en el continente sudamericano tiene un marcado ciclo estacional el cual es relacionado con la oscilación meridional de la zona de convergencia intertropical (ITCZ) (Garreaud, 2009). Este ciclo tiene mayor contraste durante los meses de invierno y verano. En el verano austral el monzón sudamericano (SASM) es el principal mecanismo estacional, el cual transporta humedad que se origina en el océano Atlántico tropical norte hasta el continente, y qué alimenta las precipitaciones sobre la región Amazónica (Figura 10a). Por otro lado, durante el invierno austral, en los niveles bajos (850 hPa) predominan los regímenes de vientos, mientras que en el norte del Ecuador se ubican los núcleos de precipitación (Figura 10b) (Garreaud et al., 2009).

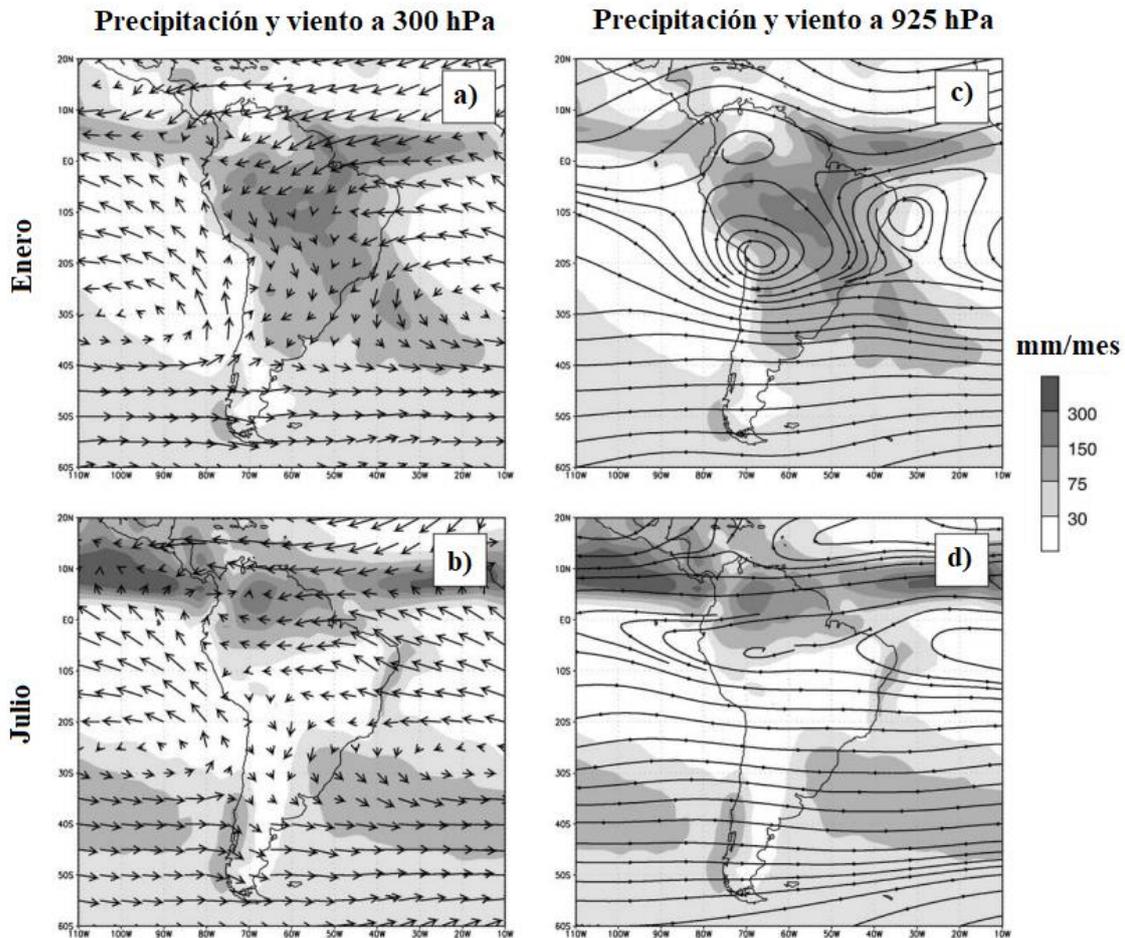


Figura 10: Climatología de las precipitaciones (sombras), vientos a 925 hPa (vectores) y vientos a 300 hPa (líneas), durante el mes de enero (a, c) y julio (a, b)

Fuente: Garreaud et al., (2009)

A medida en que empieza la fase de activación del SASM, las precipitaciones avanzan en dirección al sur, antes de eso existe un incremento en la frecuencia de los vientos que se encuentran en el Norte. En la fase de madurez, el núcleo convectivo está ubicado en la parte central del Brasil. En los niveles bajos (850 hPa), se puede apreciar un sistema continental de baja presión que se ubica noroeste de la Argentina. En la parte oriental de la Cordillera se intensifica el flujo de los vientos del norte, y que regularmente origina una corriente de chorro en los niveles bajos (Low level jet – LLJ) que lleva hasta las llanuras subtropicales enormes cantidades de humedad, pasando entre la Cordillera Andina y el escudo brasileño (Figura 11). Se crea una banda diagonal de precipitación y nubosidad que se conoce como la zona de convergencia del atlántico sur (ZCAS) y que se presenta durante todo el año, aunque con mayor frecuencia en los meses de verano cuando el núcleo convectivo conecta al centro de la región Amazónica, el cual se manifiesta con intensas lluvias al sureste de

América del Sur (Vera et al, 2006). El calor latente que se libera en la Amazonía impulsa a que se forme un sistema de alta presión en los niveles altos (200 a 300 hPa) que se conoce como la Alta Bolivia, junto a una baja cerca en la costa del noreste de Brasil. La fase de decaimiento es anticipada por un aumento en la frecuencia de los vientos del sur. En esta etapa las precipitaciones empiezan a mermar gradualmente y se movilizan hacia el Ecuador.

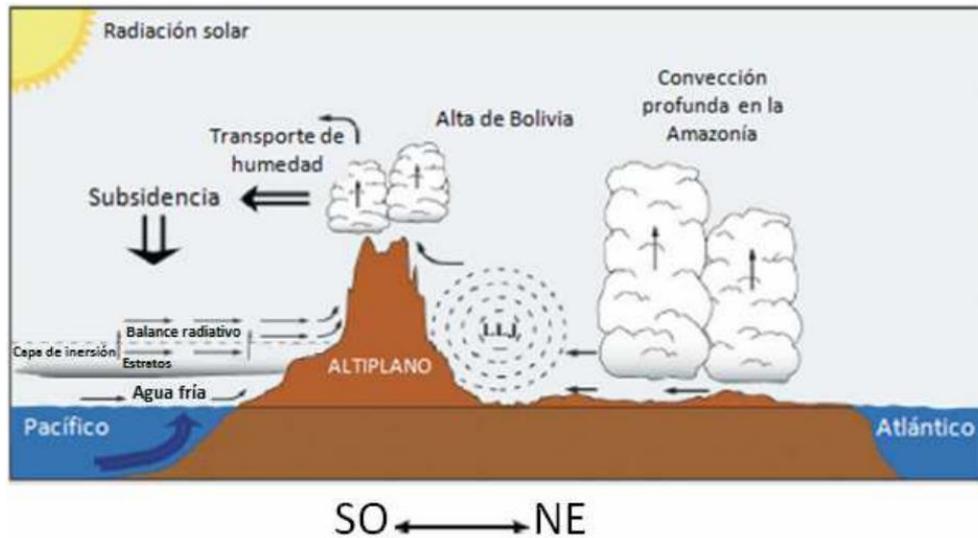


Figura 11: Sección transversal esquemática que muestra los principales elementos del monzón sudamericano

Fuente: Vera et al., (2006)

En la vertiente occidental de los Andes se encuentra el desierto costero entre Perú y Chile, es una región árida importante cuyo clima se ve influenciado por las aguas frías oceánicas de la corriente de Humboldt, la subsidencia que se asocia a la célula de Walker y el afloramiento costero que permiten que se generen condiciones secas y frías. Todo esto, sumado a la áspera topografía, permite que la humedad ascienda hacia los Andes (Vuille, 2013; Rutllant et al, 2003). Otra región importante es el noreste de Brasil, el cual es una zona de subsidencia, esta se origina en compensación con la fuerte ascendencia sobre la Amazonía en los meses lluviosos (Sulca et al., 2016). Las presiones altas en esta región facilitan las condiciones atmosféricas estables y la falta de lluvias. En las llanuras tropicales de los Andes, las masas de aire que cruzan la Cordillera desde el oeste trasladan poca humedad, manteniendo un clima seco en la Patagonia Argentina (Garreaud, 2008).

2.3 Distribución espacial y temporal de las precipitaciones en el Perú

La temporada húmeda en la costa, sierra y selva del Perú, por lo regular comienza en el mes de setiembre y se extiende hasta abril del año próximo, durante el periodo diciembre-marzo se presentan las mayores precipitaciones debido a que durante estos meses los sistemas atmosféricos que originan las lluvias se presentan con mayor intensidad y persistencia (SENAMHI, 2016).

SENAMHI (2016) realiza un análisis de la climatología precipitaciones mensuales para el periodo 1998-2014 en 14 regiones climáticas del Perú (Figura 12), donde señala que: en la región Costa Norte (CON) se alcanzó una precipitación promedio de 4.34 mm en el mes de febrero y el valor más bajo fue de 0.31 mm en agosto. En la Costa Central (COC) la precipitación máxima promedio fue de 20.17 mm y la mínima de 0.41 mm registrada en junio. En la región Costa Sur (COS) se estimó en promedio un valor de 30.64 mm en marzo, y un mínimo de 1 mm en el mes de agosto. En la Sierra Norte Occidental (SNC) el promedio máximo fue de 7.85 mm registrado en febrero, mientras que la mínima fue de 0.52 mm en el mes de agosto. En la Sierra Norte Oriental (SNR) se obtuvo 45.3 mm en el mes de febrero y 1.67 mm en julio. Por otro lado, en la Sierra Central Occidental (SCC) para marzo se obtuvo una precipitación de 33.61 mm y en 1.69 mm en el mes de agosto, siendo este el mínimo anual. En la región Sierra Central Oriental (SCR) se obtuvo 51.95 mm máximo acumulado de lluvia en el mes de marzo y 7.92 mm en agosto, como el menor en todo el año. Mientras que en la Sierra Sur Occidental (SSC) se presentó una lluvia máxima acumulada de 53.15 mm en promedio durante el mes de marzo y el menor en agosto, con un promedio de 6.41 mm. Para la Sierra Sur Oriental (SSR) se estimó una precipitación máxima promedio del año de 76.88 mm en el mes de marzo y el mínimo fue de 33.44 mm, presentada en el mes de agosto. En la región Selva Norte (SEN) se obtuvo una precipitación de 102.46 mm en el mes de enero, que representó el máximo promedio, mientras que el mínimo fue de 0.52 mm en agosto. En la Selva Central Alta (SCA) se registró 101.17 mm en promedio como la máxima precipitación ocurrida en marzo y el mínimo fue 24.83 mm durante el mes de agosto. Por otro lado, en la región Selva Central Baja (SCB) se registró 83.31 mm de lluvia en el mes de marzo y 27.84 mm en el mes de agosto. Para la región Selva Sur (SES) la precipitación máxima mensual acumulada fue de 95.35 mm y la mínima de 47.12 mm, en los meses de marzo y agosto, respectivamente. Finalmente, en la región del Altiplano (ALT) se estimó 74.56 mm de lluvia en promedio durante el mes de marzo, mientras que el mínimo se alcanzó en agosto con una lluvia acumulada promedio de 24.61 mm.

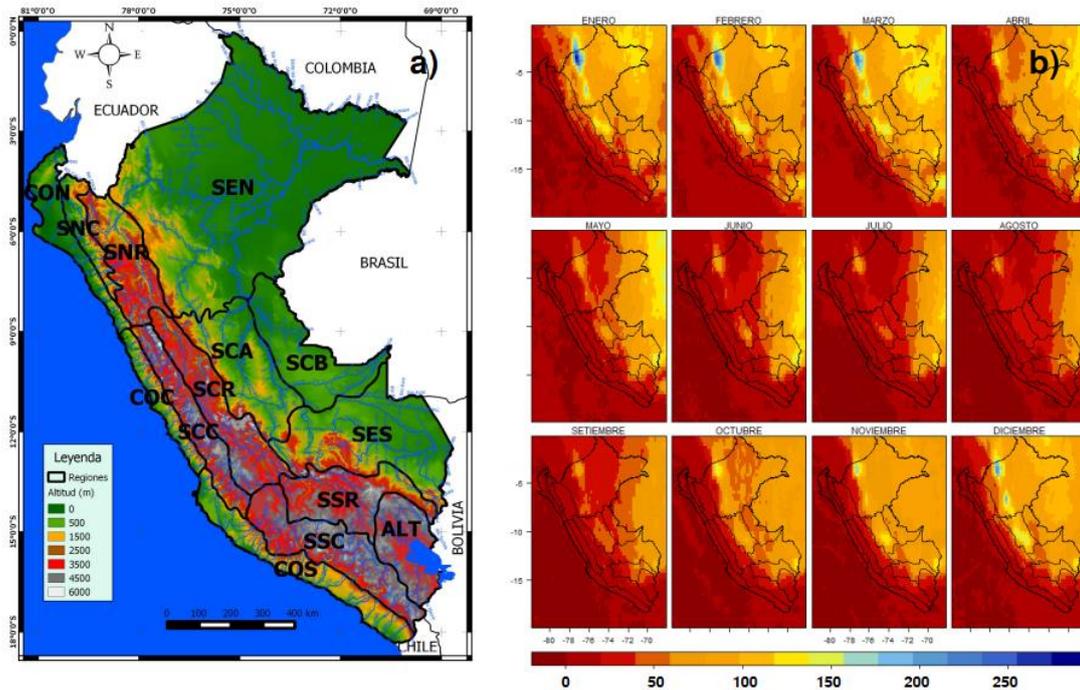


Figura 12: a) Mapa de regiones climáticas del Perú. b) Climatología de precipitación mensual del periodo 1998 – 2014 (mm/mes)

Fuente: SENAMHI (2016)

Existe una clara oposición del ciclo estacional de lluvias entre las zonas norte y sur de la cuenca Amazónica (Figura 13). Durante la temporada húmeda se alcanzan los picos de lluvias en la zona norte, asociados al calentamiento del continente y el aumento de la temperatura superficial del mar en la zona del Atlántico tropical y el Pacífico tropical este (Pulwarty et al., 1998). En el sur, el pico de precipitación durante el verano (diciembre-enero-febrero) está asociado con el calentamiento del continente (Fu et al., 1999), una baja de altitud geopotencial en la zona del Chaco y el *Low level jet* relacionado a lo largo del flanco oriental de los Andes; los regímenes en esta zona se diferencian en función a la duración del periodo de estiaje (Zhou y Lau, 1998; Saulo et al., 2000; Marengo et al., 2004). En los Andes tropicales, la época de estiaje se da entre mayo y setiembre; por otro lado, en las llanuras bolivianas esta temporada es más corta (junio-agosto), pero con mayores precipitaciones (Espinoza et al., 2009), debido al contacto entre las perturbaciones extratropicales y las tierras bajas bolivianas (Garreaud, 2000; Seluchi y Marengo, 2000). Al noreste de la cuenca Andino-Amazónica, otoño (marzo-abril-mayo) y primavera (setiembre-octubre-noviembre) representan estaciones muy diferenciadas, donde más del 50% de la precipitación del año se registra durante el otoño, mientras que la menor ocurre en primavera, con menos del 10% de la lluvia, el régimen de lluvia tropical es dominado por el océano

Atlántico (Espinoza et al., 2009). En la llanura Amazónica (frontera entre Perú, Colombia y Brasil) y las cuencas interandinas (Perú y Ecuador), el régimen de lluvia tiene un comportamiento bimodal, con picos próximos a los equinoccios (abril-octubre) y una tenue disminución durante la estación del invierno austral. El ciclo semianual es el resultado de la oscilación de la ITCZ continental, relacionado con el ciclo semianual de la radiación y la temperatura (Horel et al., 1989; Figueroa y Nobre, 1990; Poveda, 2004)

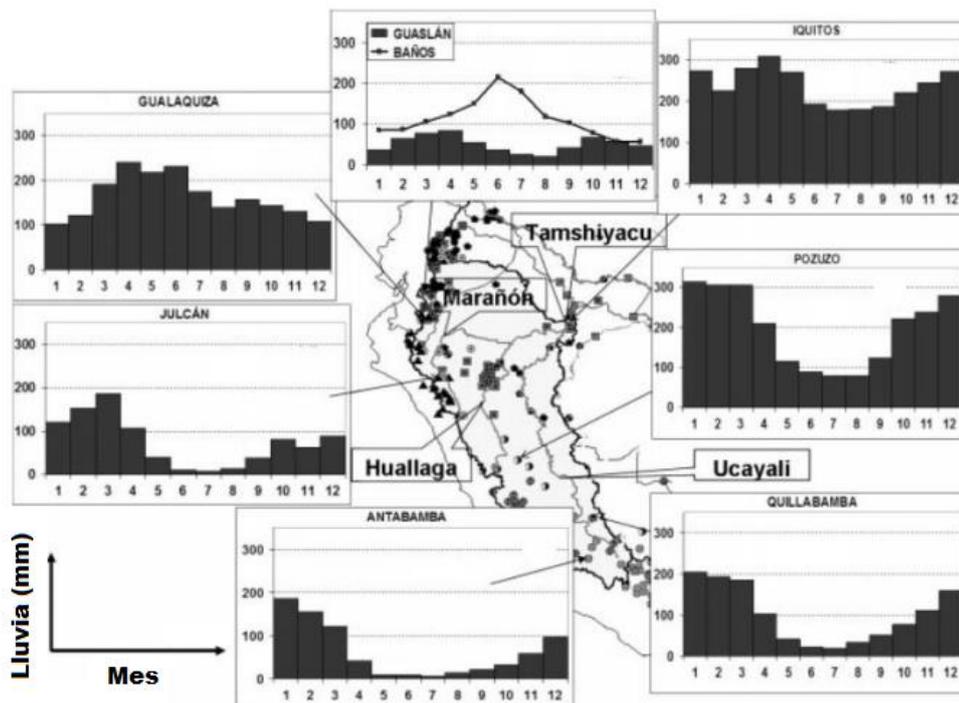


Figura 13: Régimen temporal de lluvias en la cuenca Andino-Amazónico en 8 estaciones, para el periodo 1975 – 2003

Fuente: Espinoza et al. (2009)

2.4 Sequías extremas e incendios en el Perú

Una sequía, por lo general, hace referencia a periodos con déficit de precipitaciones, lo que produce grandes impactos en la actividad agrícola, disponibilidad de agua y los ecosistemas naturales (Beguería et al., 2010). No obstante, la definición de sequía no es concreta debido a que es un fenómeno complejo; la American Meteorological Society clasifica estos eventos en cuatro grupos: sequía meteorológica, hidrológica, agrícola y socioeconómica (Richard y Heim 2002). La sequía meteorológica se presenta como periodos prolongados, meses o años, con déficit precipitación por debajo de la media (Russell et al., 1970; Palmer, 1965); la sequía hidrológica corresponde a una deficiencia en el volumen o caudal de aguas superficiales o subterráneas (ríos, lagos, acuíferos, etc.) por un periodo en el que la disponibilidad del

recurso es inadecuada para satisfacer la demanda de un determinado sistema de aguas (Valiente, 2001; Linsley et al., 1975); la sequía agrícola corresponde a un periodo de tiempo donde la humedad en el suelo es deficiente para garantizar el inicio, desarrollo o la producción de un cultivo, en función a las condiciones meteorológicas, tipo de cultivo y propiedades del suelo (Valiente, 2001); la sequía socioeconómica se produce cuando el déficit de agua alcanza un punto en el que se producen impactos económicos en la población del área afectada por la escasez de precipitación (Valiente, 2001).

Conforme al informe Perú hacia la IDMP (“Integrated Drought Management Programme”), publicada en el 2013 (http://www.droughtmanagement.info/literature/UNWDPC_NDMP_Country_Report_Peru_2013.pdf), en el Perú la mayoría de las sequías son recurrentes en el tiempo, esto debido al comportamiento climatológico e hidrológico de carácter cíclico. La intensidad de estos eventos, incluyendo áreas importantes de la Costa y la Sierra, estarían asociadas a la ocurrencia de eventos como el Fenómeno El Niño. Marengo y Espinoza (2015), indican que las variaciones en la temperatura superficial del mar (TSM) del océano Pacífico y Atlántico cumplen un papel importante en la variabilidad hidrológica y pluviosidad en la Amazonía, lo que pueden producir eventos de sequía. Los impactos ambientales de estos fenómenos se presentan con un aumento del riesgo de incendios, que podrían afectar a la población (Manta, 2017; Zubieta, 2019). En la región andino-amazónica, las sequías han significado uno de los mayores desastres naturales que han dejado importantes daños en la sociedad (Federal Emergency Management Agency, 1995; National Climatic Data Center, 2003). En las últimas décadas, sobre la cuenca andino-amazónica se han presentado eventos de sequías con mayor frecuencia, estas fueron asociadas al calentamiento global, por lo que se prevé que se presenten con mayor recurrencia e intensidad en la parte final del siglo XXI (Marengo y Espinoza, 2015; Guimberteau et al., 2013; Boisier et al., 2015).

Los eventos El Niño que se presentaron en 1912, 1926, 1983 y 1997-1998 fueron asociados a sequías extremas y posterior incremento de incendios forestales en algunas regiones de la cuenca Amazónica (Aceituno, 1988; Uvo et al., 1998; Williams et al., 2005). SENAMHI (2019), identificó 10 episodios de sequías (entre moderadas y extremas) en las regiones altoandinas del Perú entre 1981 y 2018. Estos fenómenos se presentaron en los años 1982, afectando una cobertura espacial de 12.9% de los Andes peruanos, 1983 (38.6%, en su mayoría en condición extrema), 1985 (21.6%), 1987 (25.1%), 1988 (21.3%), 1990 (71.3%),

1992 (78.5%, en su mayoría en condición extrema), 2004 (45.7%), 2005 (25.2%) y 2016 (18.8%). De estos, se destaca las ocurridas en 1990 y 1992, debido a sus impactos tuvieron alcances en 19 y 16 departamentos, respectivamente. Los patrones océano-atmosféricos en el Pacífico refleja la fase cálida de El Niño Oscilación Sur (ENOS) durante los años secos mencionados. Sin embargo, las sequías presentadas durante 1982, 1990 y 2004 se desarrollaron durante la fase neutra del ENOS. En la Amazonía las sequías severas ocurridas en 1964 y 2005 se vincularon a la influencia activa de la TSM en el océano Atlántico tropical (Marengo et al., 2008; Zeng et al., 2008). Asimismo, la sequía presentada en el 2010 se relacionó con las sucesivas ocurrencias de fenómenos El Niño en el verano austral y una elevada temperatura del Atlántico norte tropical durante la primavera y el verano boreal, acompañada de un aumento en la tasa de incendios, pérdida de la cobertura vegetal y un incremento en la mortalidad de los bosques (Espinoza et al., 2011; Marengo et al., 2011; Gutierrez, 2018).

2.5 Factores antrópicos asociados a la ocurrencia de incendios en el Perú

De acuerdo a estudios sobre ocurrencia de incendios forestales en el Perú (Manta y León 2004, SERFOR 2018) y el mundo (FAO 2005, Manta 2007), se ha determinado que las razones antropogénicas son las causantes de aproximadamente 98% de estos eventos. En la sierra peruana, las causas naturales solo representan el 0.5%, mientras que el 1.5% restante se desconoce (Manta, 2017). SENAMHI (2018) manifiesta que una de las condiciones que favorecieron la ocurrencia severa de incendios durante el 2016 fue el déficit de precipitación, principalmente en el mes de noviembre, el cual fue catalogado como el mes con mayor déficit de los últimos 20 años en la sierra nor-occidental, y de los últimos 30 años en la sierra centro-occidental. Manta (2017) señala que los incendios generados por factores antrópicos pueden ser directos o indirectos, estos responden al uso del fuego en las diferentes actividades productivas (Tabla 5). Muchas de estas acciones humanas se llevan a cabo de manera negligente, debido a que no guardan los cuidados adecuados para que el fuego no se descontrola, aun conociendo los daños que se pueden alcanzar.

Tabla 5: Principales causas de incendios forestales en la sierra peruana

Causas	Descripción
Humana (98%)	
Humana directa	Negligencia En actividades ganaderas (60%) En actividades agrícolas (30%) En actividades de caza En festividades y celebraciones En actividades de turismo
	Intencionales Ampliación de frontera pecuaria y agrícola Conflicto de pobladores con las ANP Explotación minera, construcción de carreteras y urbanizaciones
	Accidentales Juego con el fuego Fallos en la línea de alta tensión eléctrica Construcción de gaseoductos y oleoductos
Humana indirecta	Contraposición de políticas y normas legales Título de propiedad en tierras públicas forestales y de protección Cultivo ilícito y programas de erradicación Actos de corrupción
Naturales (0.5%)	Caída de rayos
Desconocidas (1.5%)	

Fuente: Manta (2017)

SERNANP (2016) señala que, en las Áreas Naturales del Perú, las causas de los incendios corresponden a un 50% por el cambio de uso de suelo, 41% por la quema de pastos como actividad ancestral, 3% por el uso del fuego para obtener leña y el 3% debido a negligencias.

USAID (2015) menciona que la ocurrencia de incendios en el Perú es asociada a diferentes causas, siendo las actividades antrópicas las que generan mayor número de siniestros (90 %). Estos pueden ser distinguidos por regiones:

Región Amazónica

Asociada a la ampliación de la frontera agrícola, principalmente para cultivos comerciales como la palma aceitera, cacao y frutales, el cual se realiza por medio de quemas en áreas deforestadas para el cambio de uso de suelo. Se debe precisar que cualquier tipo de quema está prohibido de acuerdo a lo que se indica en la legislación agraria y legislación forestal y de fauna silvestre (Reglamento para la Gestión Forestal, aprobado mediante Decreto Supremo N° 018-2015-MINAGRI).

Región Andina

Relacionado con la quema de pastos para la renovación de estas y su uso como alimento para el ganado, también con la quema de áreas boscosas con el fin de ampliar las zonas agrícolas, debido a que existen especies no nativas (eucalipto y pino) que son usadas en plantaciones ubicadas hasta una altitud de 3800 msnm y que presentan compuestos altamente inflamables, los cuales intensifican el fuego, convirtiéndolas en incendios forestales, provocando la pérdida de asociaciones vegetales, principalmente de los pastos naturales. Adicional a esto, existe una fuerte incidencia de incendios en humedales altoandinos debido a la quema de especies como la totora, lo que ocasiona la pérdida de la flora y la fauna silvestre.

Región Interandina

En esta zona, donde ocurre la transición entre la región Andina y la Amazonía, los incendios están asociados a las quemas para el manejo de las chacras, por lo que asociaciones como los bosques de niebla se ven amenazados. Las quemas realizadas en este tipo de ecosistemas (ceja de selva) se ven favorecidas al existir pendientes fuertes, la cual facilita que se terminen convirtiendo en incendios forestales.

Región Costa Norte

Los incendios se relacionan con la preparación de tierras agrícolas mediante la quema de pastos y rastrojos en lugares informales. También en los bosques secos, la mayoría de incendios son provocados por personas que utilizan el fuego como agente controlador de abejas silvestres para la obtención de miel, las cuales se realizan en la base de los árboles.

(Manta, 2017) En el Perú existen numerosas normas legales que conforman el marco regulatorio de los incendios forestales, algunas de estas son:

El Decreto Ley N° 21147 (conocida como la primera Ley Forestal y de Fauna Silvestre), junto a su Reglamento de Ordenación Forestal, promulgada en 1976, indican que estos eventos son considerados infracciones que deber ser sancionada, según la gravedad del daño, con multas o pena privativas de la libertad.

En 1991, mediante el Decreto Legislativo N° 635, se establece que a toda persona que destruya, quema y dañe el bosque o alguna formación natural, se le impondría una pena privativa de la libertad entre 1 a 3 años. Asimismo, si el delito repercutía sobre la disponibilidad de agua natural, erosión de suelos o cambios en los regímenes climáticos, la pena estaría entre 2 y 4 años.

En el 2000 se promulgó la segunda Ley Forestal y de Fauna Silvestre con N° 27308 y en 2001 su Reglamento. Tuvo la finalidad de prevenir y prohibir las quemas sobre los bosques y otras formaciones forestales a nivel nacional, para lo que creó el Sistema Nacional de Prevención y Control de Incendios Forestales, salvo un permiso del Instituto Nacional de Recursos Naturales (INRENA, en la actualidad SERFOR).

En 2011 se promulgó otra Ley Forestal y de Fauna Silvestre (N° 29763), el cual no cuenta con un reglamento hasta la fecha. Pese a que los incendios forestales se incrementaron en el país, esta Ley no prioriza la prevención y control de las quemas agropecuarias.

A pesar de esto, muchas de estas normas no se priorizaron debidamente por lo que no llegaron a implementarse por las entidades encargadas.

2.6 Índices obtenidos a partir de satélites para el monitoreo del desarrollo de condiciones vegetativas y asociados

Bravo et al. (2013) propone una alternativa para la caracterización periódica del estado de la vegetación, este consiste en la aplicación de índices de vegetación a partir del procesamiento espectral de información proveniente de datos satelitales, además de que permite cubrir grandes extensiones a una frecuencia temporal alta.

Gonzaga (2014), realizó un estudio que consistió en la evaluación de los índices NDVI (índice de vegetación de diferencia normalizada), MSI (índice de estrés hídrico) y SAVI (índice de vegetación ajustado al suelo, para la estimación de cambios de diferentes tipos de cubierta vegetal en provincia de Loja al sur de Ecuador. Los resultados mostraron que los tres índices fueron capaces de discriminar las diferentes variedades de cobertura, así como la capacidad para estimar el desarrollo de las coberturas vegetales, respecto a variables climáticas.

Bravo et al. (2013) caracteriza el comportamiento del índice mejorado de la vegetación (EVI) sobre cinco coberturas naturales del occidente, norte y noroeste de México (Selva baja caducifolia, Matorral xerófilo del desierto sonorense, y del Desierto Chihuahuense; Bosques de encino, Bosques de encino-pino), en el periodo 2000-2013. Los hallazgos en las tendencias que sigue este índice sugieren caídas espacialmente relevantes del desarrollo de la vegetación en todas las coberturas estudiadas, principalmente en los Matorrales Xerófilos, acorde a la degradación de los ecosistemas por actividades pecuarias, y el cambio climático.

Chuvieco et al. (2001) presenta una comparación entre los índices NDVI y NDII (índice de vegetación del infrarrojo) para la estimación del contenido de humedad en diferentes especies vegetales mediterráneas, entre suroccidente de la provincia de Toledo y el noroccidente de Ciudad Real, entre 1996 y 1999. Se considera al NDVI como un índice que responde bien al contenido de agua en pastizales, pero no de los matorrales, esto debido a que es más sensible a las variaciones del verdor vinculado a la pérdida de agua en herbáceas, que al contenido de agua propiamente dicho. Respecto al NDII, es un índice que funciona bien para estimar la humedad en matorrales y pastizales, debido a que integra una banda en el pico de absorción de radiación por el agua presente en las hojas (infrarrojo cercano).

Vicente (2014) con el fin de evaluar y monitorear el estado de las sequías del Noreste Argentino, implementa una metodología, que se basa en los índices NDVI y NDWI (índice de agua de diferencia normalizada) para identificar las condiciones de humedad durante los periodos de déficit hídrico entre el año 2001 al 2009. El análisis espacio temporal que se hizo, determinó que los índices de vegetación evaluados son compatibles con las variaciones de humedad del ambiente, en especial el NDWI, por lo que pueden ser usados en el monitoreo de sequías.

Sánchez et. al (2008) recurre al índice de vegetación EVI para caracterizar el desarrollo de la vegetación en Galicia (noroeste de España), durante un periodo de 6 años, y así elaborar un modelo de predicción de riesgo de incendios. La variación de los valores de EVI presentados se ajusta bastante bien a los casos afectados por los incendios, siguiendo una distribución lineal, con un error de estimación de 15%, por lo que se establece una clasificación de tres niveles de peligrosidad para catalogar la mayor o menor probabilidad de que se produzca un incendio en una zona.

Basadas en estudios de percepción remota, existen diferentes sistemas de alerta sobre el peligro de incendios a través de índices basados en datos meteorológicos, por ejemplo, el FWI correspondiente al sistema canadiense (Fire Weather Index), el índice Keetch Bryam desarrollado en los Estados Unidos, y índice de Mc Artthur, utilizado en Australia; estos proporcionan una estimación temprana de las condiciones de peligro asociadas a las condiciones atmosféricas. Aguado y Camia (1998); Lau (2017), determinan algunas limitaciones de estos sistemas debido a que los índices se calculan a partir de los datos climáticos obtenidos desde estaciones meteorológicas que se encuentran en zonas puntuales, esto implica que se realicen trabajos de interpolación y extrapolación espacial que no resultan muy precisas para algunas variables (viento y precipitación); además de no estar calibrados para estimar las condiciones físicas de la vegetación viva, las cuales resultan ser importantes para entender el comportamiento del fuego sobre la cobertura.

2.7 Espectro electromagnético

Para analizar y procesar las imágenes satelitales que documentan el estado de la vegetación, es importante comprender e identificar entre que rangos del espectro electromagnético se establecen la vegetación. Chuvieco (1995) describe el espectro electromagnético como el conjunto de ondas electromagnéticas o a la radiación electromagnética que un material, de manera natural o artificial, emite o absorbe. Esta radiación electromagnética (Figura 14) puede ser clasificada en función de su frecuencia (en Hz o ciclos s^{-1}) o su longitud de onda (m). Si bien las longitudes de onda varían en forma continua, suelen asignarse una serie de bandas en donde el comportamiento de la radiación electromagnética es parecido. El espectro electromagnético está comprendido desde aquellas ondas con longitudes muy cortas (rayos gamma, rayos X), hasta aquellas que alcanzan longitudes kilométricas (telecomunicaciones). En teledetección es conveniente destacar las siguientes bandas espectrales:

- El espectro visible (400 a 700 nm). Denominada de esta forma al ser una radiación electromagnética que puede ser percibida por el ojo humano y que, además, coincide con las longitudes donde la radiación solar es mayor. Se distinguen tres bandas cuyas longitudes de onda están asociadas a los colores elementales: azul (400 - 500 nm), verde (500 - 600 nm), y rojo (600- 7000 nm).
- Infrarrojo cercano (700 nm - 1300 nm). Es de gran importancia para este estudio, debido a la capacidad que tiene para discriminar contenidos de humedad y masas vegetales.
- Infrarrojo medio (1300 - 8000 nm). En donde se confunden los procesos de reflexión entre la luz solar y la energía que emite la superficie de la tierra.
- Infrarrojo lejano o térmico (8000 - 14000 nm). que incorpora la fracción emisiva del espectro de la tierra.
- Microondas (a partir de 1 mm). Importante al ser energía que traspasa las cubiertas nubosas.

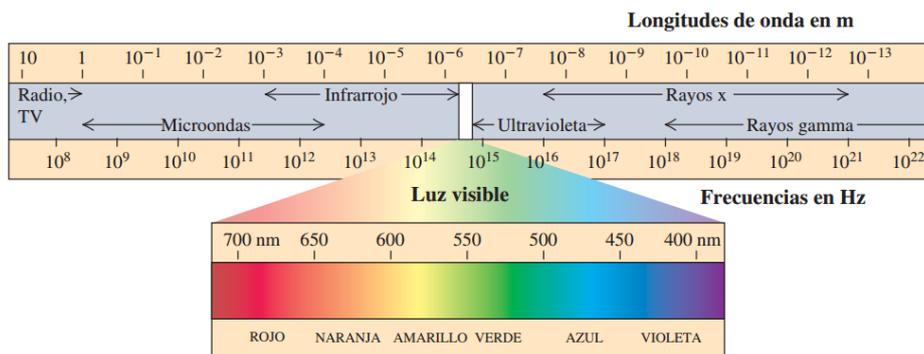


Figura 14: Espectro electromagnético y región de la luz visible

Fuente: Madhavapeddy y Thamma (2011)

2.8 Condiciones biofísicas de la vegetación y su relación con la óptica/radiación electromagnética

Una de las alternativas utilizadas con mayor frecuencia para el estudio de indicadores cuantitativos del funcionamiento de los ecosistemas es aquella donde se emplea datos de sensoramiento remoto a través de los índices de vegetación (Teillet et al., 1997; Cocero et al., 1998; Gaitan et al., 2013). Esto se debe a que existe un diseño conceptual y estructural que, a partir de datos indirectos, infiere la cantidad de energía absorbida, reflejada e irradiada por los cuerpos según las características ópticas al interactuar con su superficie. Esto permite que los índices de vegetación sean utilizados para estudiar espacial y temporalmente la cobertura vegetal, en función a las variaciones en los flujos radiante e hídrico (Rodríguez y

Bullock, 2013). Los índices espectrales o índices de vegetación se fundamentan en la combinación aritmética de dos o más bandas vinculadas a las propiedades espectrales de cuerpos como las plantas y los suelos (Figura 15). Estos índices han sido ampliamente utilizados en el monitoreo de la fenología, clasificación y la derivación biofísica de los patrones estructurales y radiométricos de la vegetación. Pearson y Miller, desarrollaron en 1972 por primera vez los índices denominados: Índice ratio de vegetación (RVI), el cual se calculaba a partir del cociente entre la reflectividad en la banda roja y la reflectividad media del infrarrojo cercano; y el índice de vegetación (VIN), calculado al dividir la reflectividad media del infrarrojo cercano entre la reflectividad en la banda roja, para la estimación y monitoreo de la cubierta vegetal. Rouse et al. (1974) propone el índice de vegetación de diferencia normalizada (NDVI), que es un cociente que estima las características funcionales de la vegetación activa y que es un contraste entre la reflectividad de las bandas del infrarrojo cercano y la roja. Huete (1998) utiliza las mismas bandas que el NDVI para desarrollar el índice de vegetación ajustado al suelo (SAVI), que además de representar el vigor y la estructura de la planta, incorpora un ajuste en función a la densidad del dosel y el suelo. Asimismo, existen índices que representan el contenido de agua de la cubierta del suelo y la planta, como el índice de agua de diferencia normalizada (NDWI) propuesta por Gao (1996), que utiliza la reflectividad en la banda del infrarrojo cercano y del infrarrojo de onda corta (asociada con la absorción de agua), este índice refleja la humedad en la estructura interna de la planta (Paredes, 2018).

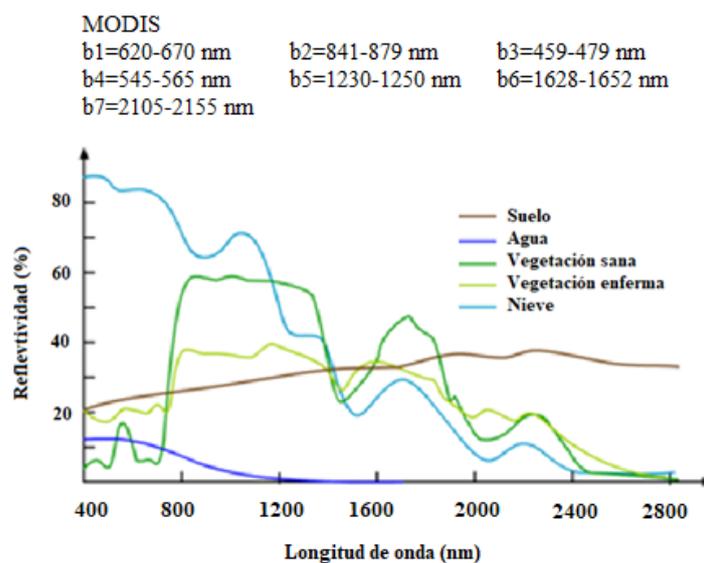


Figura 15: Firmas espectrales típicas de distintas cubiertas

Fuente: Piazzese y Oñate (2003)

Existen hoy en día, muchos índices desarrollados en campos específicos de investigación. Algunos de estos índices de vegetación han resultado muy buenos al tener una alta correlación con distintos factores de interés, por ejemplo, el contenido de la biomasa de las áreas forestales o de los cultivos. Aun así, existen desacuerdos entre los diferentes desarrolladores que hacen referencia a las ventajas y desventajas entre los índices de vegetación, los cuales se relacionan fundamentalmente con condiciones experimentales y los campos en los que son aplicados (Bannari et al., 1995).

2.9 Satélites y el monitoreo terrestre

2.9.1 Antecedentes

Los cambios en la cobertura y uso de suelo influyen de manera directa al ciclo hidrológico debido a las altas tasas de erosión que se presentan y la pérdida de la biodiversidad. El aumento de los gases de efecto invernadero genera cambios en los regímenes climáticos, lo que originan que desastres naturales como inundaciones, incendios y sequías se presenten con mayor frecuencia e intensidad. En este contexto, equipos especializados, gobiernos nacionales y grupos internacionales asumen la responsabilidad de abordar esta problemática.

Se destaca la Convención de Estocolmo en 1972, donde la comunidad científica enfatizó el estudio de la interacción existente entre la superficie terrestre, la atmósfera y la hidrósfera para poder alcanzar un mejor entendimiento de las causas y consecuencias de las actividades antrópicas sobre los ecosistemas y el clima, los cuales pueden generar alteraciones ambientales y ecológicas a una escala global (Mas, 2011).

A finales de la década de 1980 se iniciaron proyectos con el fin de monitorear las coberturas globales, tal es el caso del sensor Advanced Very High Resolution Radiometer (AVHRR) a bordo de los satélites de la serie NOAA (National Oceanic and Atmospheric Administration), cuyos datos permitió que se haga un mapeo de la cobertura de la Tierra, aunque fue diseñado originalmente para el monitoreo del clima a una resolución espacial de 1.1 km (Mas, 2011).

2.9.2 Proyecto Earth Observing System (EOS) - Moderate Resolution Imaging Spectroradiometer (MODIS)

A partir de los resultados del AVHRR se diseñaron sensores específicamente para el monitoreo de la superficie de la tierra con una alta resolución temporal que contribuir a la toma de información de áreas extensas. Tal es el caso del proyecto EOS (Proyecto Earth

Observing System, por sus siglas en inglés) de la NASA (National Aeronautics and Space Administration, por sus siglas en inglés), el cual pone en órbita tres plataformas: EOS-AM (Terra), EOS-PM (Aqua) y EOS-CHEM (Aura) para el estudio de la atmósfera, la superficie de la tierra y los océanos (Fig. 16). Dentro del proyecto EOS se destaca el sensor MODIS (Moderate Resolution Imaging Spectroradiometer, por sus siglas en inglés), a bordo de los satélites Terra y Aqua (Figura 16) que, debido a las características espaciales y espectrales que presenta, es uno de los más importantes para el monitoreo del cambio en el planeta (Rudorff et al., 2007). MODIS fue diseñado bajo la supervisión de científicos que formaron un equipo interdisciplinario alrededor de 10 años con el fin de establecer los requisitos para la captura, calibración y procesamientos de los datos (Xiong, 2008).

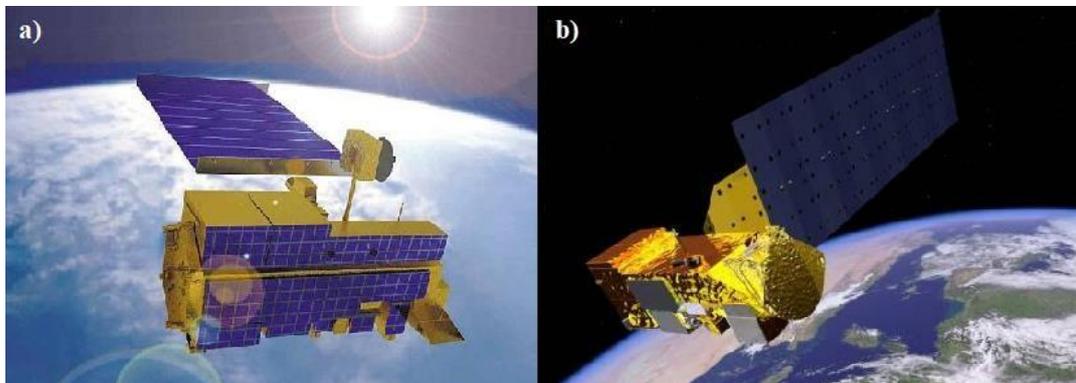


Figura 16: a) Satélite EOS-AM (Terra). b) Satélite EOS-PM (Aqua).

Fuente: Tomado del portal web <https://earth.esa.int/>

2.9.3 Sensor MODIS

El sensor MODIS se encuentra a bordo de los satélites Aqua (EOS – PM), lanzado en mayo del año 2002), y del satélite Terra (EOS-AM), lanzado en diciembre del año 1999. Estas plataformas orbitan de forma helio-sincrónica y cuasi-polar (Figura 17), con una altitud media de 705 y 708 km, con una inclinación de 98° y 98.2° , respectivamente. El satélite Terra está programado para viajar de norte a sur, cruzando el ecuador a las 10:30 de la mañana en su órbita descendente, mientras que el satélite Aqua pasa de sur a norte sobre el ecuador a la 1:30 de la tarde (Mas, 2011).

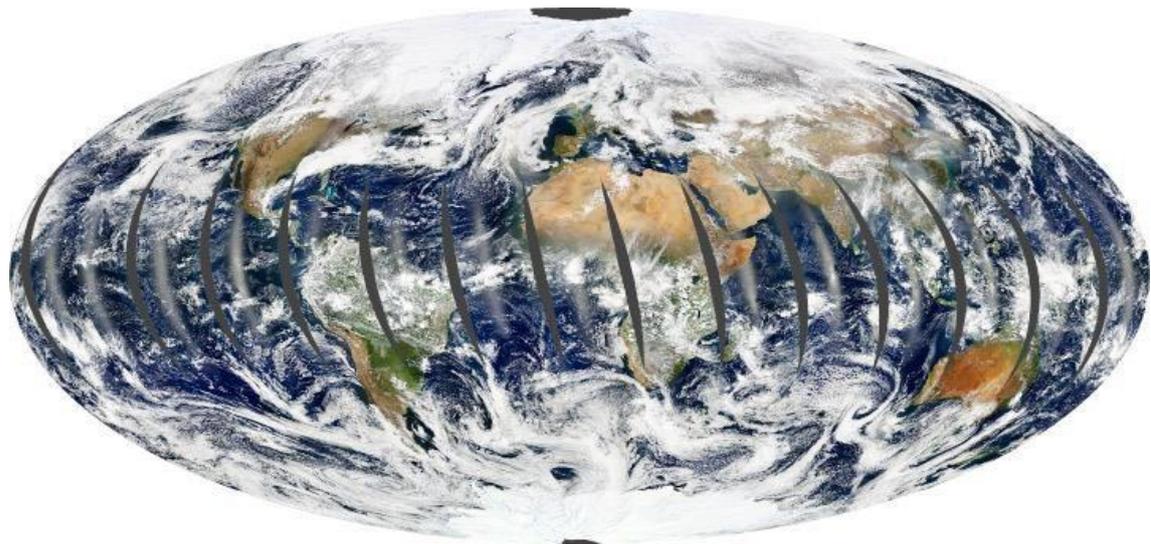


Figura 17: Esquema del escaneo que realiza el sensor MODIS a bordo del satélite Terra y Aqua

Fuente: Tomado del portal web <https://earthobservatory.nasa.gov/features/OrbitsManeuver>

MODIS cuenta con una alta sensibilidad radiométrica (12 bit) en 36 bandas espectrales en un rango de longitud de onda que comienza en los 400 nm hasta los 14 400 nm. Las primeras 19 bandas (Tabla 6), están posicionadas en la región del espectro electromagnético situado entre los 0.505 nm y 2.155 nm. Las bandas de la 1 hasta la 7 son útiles para las aplicaciones terrestres; las bandas 8 a la 16 para las observaciones oceánicas y las bandas 17 a la 19 para las mediciones atmosféricas. Las bandas 20 a la 36 (Tabla 7) cubren la porción del infrarrojo térmico del espectro (3 660 – 14 385 nm). Dos bandas son tomadas a una resolución nominal de 250 m al nadir (bandas 1 y 2), cinco bandas a 500 m (bandas 3 a 7) y las 29 bandas restantes a 1 km. Este sensor posee una alta calidad geométrica que permite el monitoreo preciso de las alteraciones de la superficie terrestre (error RMS inferior a 50m) (Mas, 2011).

Tabla 6: Características de las bandas 1 a la 19 del sensor MODIS. SNR: radio señal – ruido. Radianza espectral en W/ espectral

Uso principal		Banda	Ancho de banda (nm)	Radianza espectral	SNR
Límites	de	1	620-670	21.8	128
Tierra/Nubes/Aerosoles		2	841-876	24.7	201
		3	459-479	35.3	243
Propiedades	de	4	545-565	29	228
Tierra/Nubes/Aerosoles		5	1230-1250	5.4	74
		6	1628-1652	7.3	275
		7	2105-2155	1	110
		8	405-420	44.9	880
		9	438-448	41.9	838
		10	483-493	32.1	802
Color del océano/		11	526-536	27.9	754
Fitoplancton/Biogeoquímica		12	546-556	21	750
		13	662-672	9.5	910
		14	673-683	8.7	1087
		15	743-753	10.2	586
		16	862-877	6.2	516
		17	890-920	10	167
Vapor de agua atmosférico		18	931-941	3.6	57
		19	915-965	15	250

Fuente: Mas (2011)

Tabla 7: Características de las bandas 20 a la 36 del sensor MODIS. NE (delta) T requerido: Diferencia de temperatura (K) equivalente al ruido

Uso principal	Banda	Ancho de banda (nm)	Radianza espectral	NE (delta) T requerido
	20	3660-3660	0.45	0.05
	21	3929-3989	2.38	2.00
Temperatura/Nubes/ Superficie	22	3929-3989	0.67	0.07
	23	4020-4080	0.79	0.07
Temperatura atmosférica	24	4433-4498	0.17	0.25
	25	4482-4549	0.59	0.25
Cirrus	26	1360-1390	6.00	150
	27	6535-6895	1.16	0.25
Vapor de agua	28	7175-7475	2.18	0.25
	29	8400-8700	9.58	0.05
Ozono	30	9580-9880	3.69	0.25
Temperatura de la superficie/Nubes	31	10780-11280	9.55	0.05
	32	11770-12270	8.94	0.05
	33	13185-13485	4.52	0.25
Altitud de nubes	34	13485-13785	3.76	0.25
	35	13785-14085	3.11	0.25
	36	14085-14385	2.08	0.35

Fuente: Mas (2011)

2.9.4 Niveles de procesamiento

(Mas, 2011) Los productos MODIS se dividen en cinco niveles (0 a 4) de acuerdo al grado de procesamiento que presentan:

- **Nivel 0:** Son los datos brutos donde no se ha realizado algún tipo de tratamiento, sólo los artefactos de comunicación entre el satélite y la estación de recepción han sido eliminados.
- **Nivel L1:** Son datos de geolocalización en coordenadas geodésicas, datos sobre la elevación del terreno, máscaras de tierra y agua, ángulo de elevación, azimut y cenit del satélite y del sol.

- **Nivel 1A:** Son productos con información de niveles de radiancia en las 36 bandas, integrado con datos para la calibración radiométrica, corrección geométricas y parámetros de georreferenciación.
- **Nivel 1B:** Son los productos que presentan las radiancias calibradas y geolocalizadas para cada una de las 36 bandas generadas a partir de los productos del nivel 1A. Por lo tanto, son imágenes corregidas radiométricamente y calibradas a unidades físicas. Adicionalmente se incluye información para estimar la calidad, el error y datos de calibración de los productos.
- **Nivel L2G:** Son los productos cuyos datos tienen información de variables geofísicas que son proyectadas en una malla uniforme.
- **Nivel L2:** Estos productos presentan información de variables geofísicas. Se generan a partir del producto nivel L1B aplicando correcciones atmosféricas y algoritmos bio-ópticos.
- **Nivel 3:** Son productos generados a partir de variables geofísicas mapeadas. En algunos casos se hace un remuestreo de las bandas originales a una resolución espacial menor y se elaboran compuestos de 1, 8, 16 y 30 días).
- **Nivel 4:** Son productos generados por la integración de datos MODIS con los modelos para así estimar variables geofísicas. Para esto se utilizan productos nivel L2 y datos auxiliares.

2.9.5 Productos MODLAND

Con base en la información que provee el sensor MODIS es posible elaborar diversos productos. Algunos enfocados al estudio de los océanos (MOcean), atmósfera (MODIS Atmosphere) criósfera y las coberturas terrestres (MODLAND). Los productos MODLAND, si corresponden a la plataforma *Terra* incluirán en su nomenclatura la palabra *MOD*, si provienen de la plataforma *Aqua* incluirán la palabra *MYD*, y si resultan de una combinación de ambas plataformas, serán identificados con la palabra *MCD*. Estos datos pueden ser clasificados en tres grandes grupos (Morissette et al., 2002):

- **Variables relacionadas al balance de energía:** reflectividad de la superficie (MOD09), coberturas de nieve (MOD10), emisividad y temperatura de la superficie de la tierra (MOD11), el albedo y la función de la distribución de la reflectividad bidireccional (MOD43).

- **Variables biofísicas relacionadas a la vegetación:** índices de vegetación (MOD13), LAI (índice de área foliar por sus siglas en inglés) y la fracción de radiación activa fotosintética FPAR (MOD15) y producción primaria (MOD17).
- **Características de la cobertura terrestre:** coberturas del suelo (MOD12), focos de calor e incendios (MOD14), conversión de cobertura vegetal y fracción de vegetación (MOD44) y áreas quemadas (MCD45).

2.9.6 Productos MOD09

Los productos MOD09 son productos con un nivel de procesamiento de Nivel 3. Proveen información sobre la estimación de la reflectividad de las cubiertas terrestres en las siete primeras bandas, donde se corrigen los efectos atmosféricos que se pueden producir debido a los gases, nubes cirrus y aerosoles. Las imágenes MOD09GQ, MOD09GA y MOD09CMG son productos diarios a una resolución de 250m, 500/1000m y 0.05°, respectivamente. Los productos MOD09A1 y MOD09Q1 son compuestos de cada 8 días a una resolución espacial de 8 días, respectivamente (Mas, 2011).

2.10 Herramientas para el procesamiento de datos

2.10.1 Sistemas de información geográfica

Un Sistema de Información Geográfica o SIG, puede definirse como aquel método o procesamiento de la información geográfica que hace posible combinar eficientemente datos básicos para obtener información derivada. Para esto se debe contar tanto como las bases de información como con un conjunto de herramientas de informática (software y hardware) que facilitan este trabajo; todo ello dentro del marco de un proyecto definido por un grupo de personas, asimismo, controlado por técnicos de su correcta implantación y desarrollo. Entonces, un SIG es una herramienta que combina información del espacio (mapas) y de atributos (estadísticas) con el fin de obtener datos derivados sobre el territorio (Dominguez, 2000).

Los SIG son importantes debido a que, al ser una herramienta que integra información tanto espacial como no espacial en sistemas simples, pueden ser utilizados en la toma de decisiones para el desarrollo sostenible, al proveer información útil a los decisores, mediante el análisis y evaluación de un marco de datos geográficos (Murai, 1999; Rosete y Bocco, 2003).

a) Componentes de un SIG

Un SIG se caracteriza por presentar básicamente cuatro componentes: el hardware de la computadora (parte física del sistema), el software de la computadora (programas de aplicación), los datos y el equipo humano (Gomez y Barredo, 2006). Es necesario, también, que los sistemas de información geográfica dispongan de diseño bueno y que este se base en reglas definidas, que son las prácticas o modelos operativos exclusivos en toda organización (Peña, 2008).

Olaya (2011), menciona que una de las formas de ver a los SIG es entendiendo los componentes básicos se muestran en la Figura 18 y se describen a continuación:

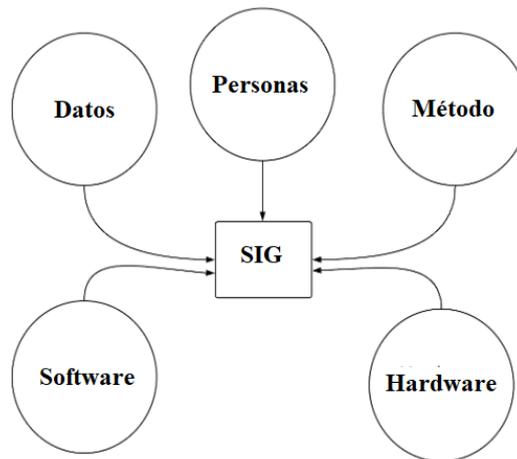


Figura 18: Elementos básicos de un SIG

Fuente: Olaya (2011)

- **Datos:** Contienen la información geográfica base para cualquier trabajo de un sistema de información geográfica.
- **Métodos:** Se refiere al conjunto de procedimientos y metodologías a aplicar sobre los datos.
- **Software:** Es la aplicación informática que pueda trabajar con la base de datos a través de los métodos.
- **Hardware:** El equipo computacional que se necesita para ejecutar los softwares.
- **Personas:** Son las encargadas de hacer el diseño y utilizar el software, siendo el impulsor del sistema SIG.

b) Funciones de los SIG

Rodgers (1993), describe algunas de las operaciones de los SIG en función a la entrada y salida de los datos:

▪ Ingreso de datos

Hace referencia a todas las operaciones por la cual los datos espaciales de mapas, sensoramiento remoto y cualquier fuente convertida a un formato digital. Estos datos SIG son de dos tipos: las referencias geográficas que fijan la ubicación de los datos que se ingresan (coordenadas), y los atributos que asignan un código en formato numérico a cada conjunto de coordenadas y variables, ya sea para interpretar los valores actuales o para indicar alguna categoría.

▪ Almacenamiento de datos

Se refiere a la manera en cómo los datos espaciales se estructuran y se organizan dentro de los sistemas de información geográfica, en función a la ubicación, diseño de atributos y su interrelación (Figura 19). La organización de estos datos puede ser representada a través de modelos vectoriales (puntos, líneas y polígonos), que se almacenan como una colección de coordenadas X, y modelos raster (celdas) que permiten relacionar paquetes de información por medio de píxeles que forman una imagen digitalizada. (Cruz, 2019).

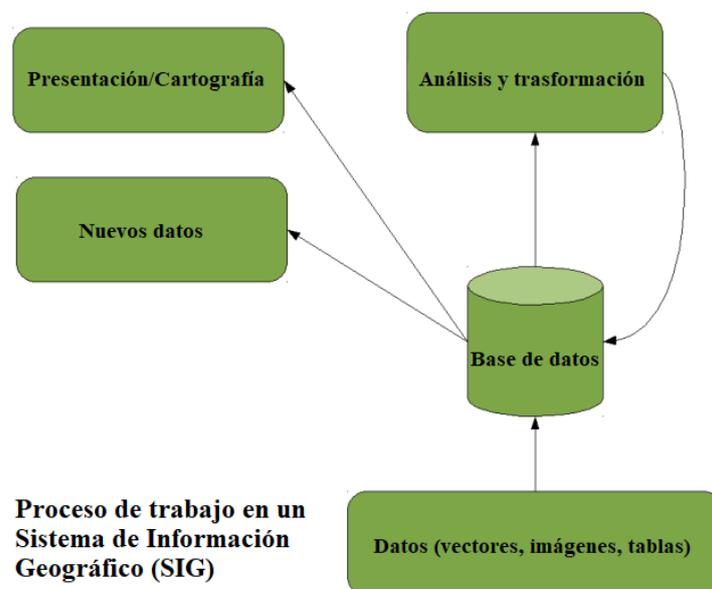


Figura 19: Almacenamiento de datos SIG

Fuente: Cruz (2019)

▪ **Manipulación y procesamiento de datos**

Olaya (2011) describe que la manipulación y el procesamiento de datos se realiza con el fin de conseguir información apropiada de los datos que fueron ingresados al sistema. La manipulación de los datos comprende dos tipos de operaciones: i) procedimientos para eliminar errores y reemplazar los datos actuales; ii) procedimientos que se basan en técnicas analíticas para dar respuestas concretas a las preguntas que el usuario formula. La manipulación puede realizarse desde una simple superposición de mapas, hasta una extracción compleja de componentes con informaciones diferentes (Figura 20).

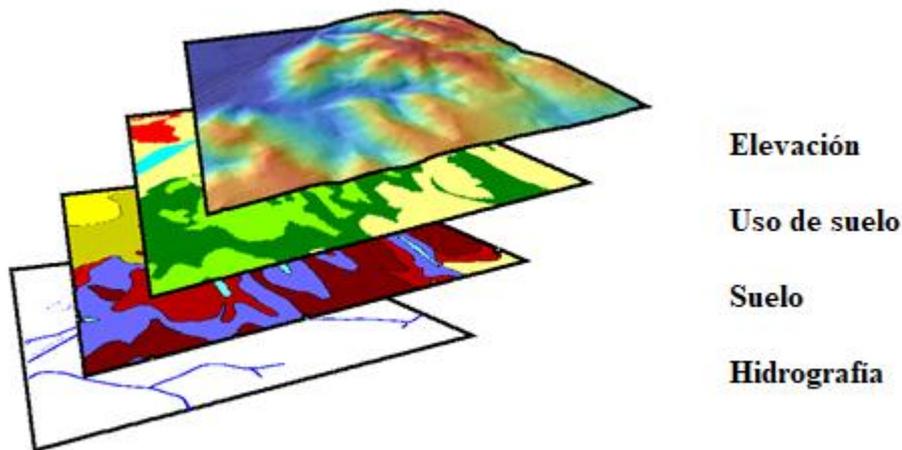


Figura 20: Capas de información geográfica dentro de un SIG

Fuente: Adaptado de Olaya (2011)

▪ **Producción de datos**

Hace referencia a la presentación o exposición de datos utilizando formatos que incluyen, frecuentemente, mapas, informes, gráficos, cartas y cuadros. Estos son ampliamente utilizados en el sector forestal, agrícola, pecuario, pérdida de suelos, etc. (Cruz, 2019).

2.10.2 Análisis de datos satelitales a partir de softwares

Cuando se habla de este tipo de softwares (software SIG) se hace referencia a los sistemas informáticos que permiten editar, integrar, almacenar, analizar, visualizar y compartir información satelital georreferenciada (Rodríguez y Olivella, 2010).

En todos los softwares de este tipo se dan tres etapas elementales: el input o entrada de información, el proceso (procesamiento de los datos) y el output o salida de información (Figura 21).

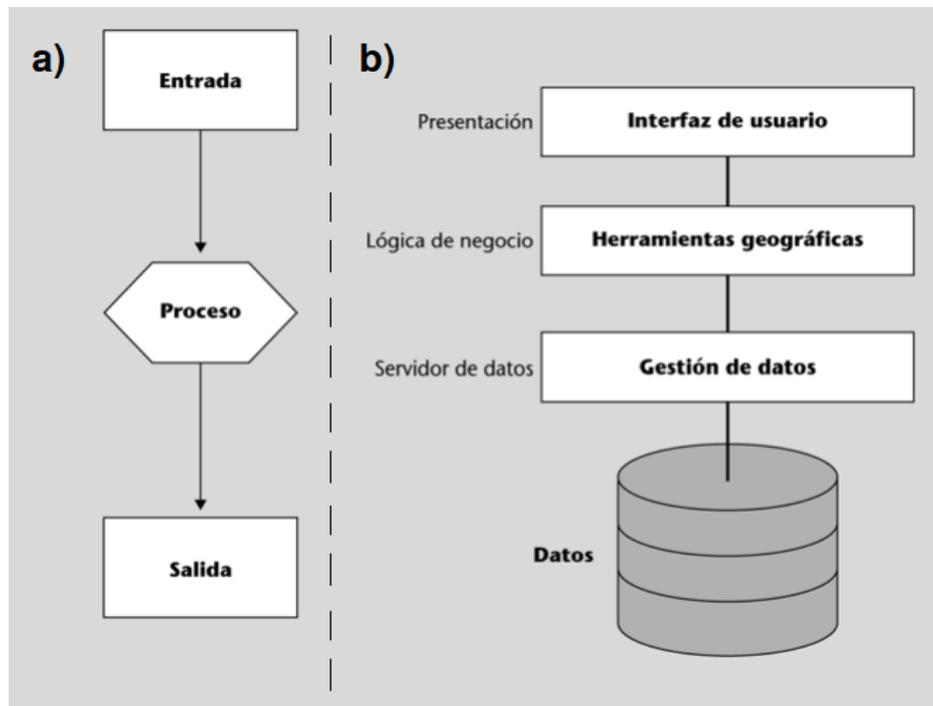


Figura 21: a) Etapas básicas en el proceso relacional de software sig. b) Arquitectura clásicas de software SIG

Fuente: Adaptado de Rodriguez y Olivella (2010)

(Rodriguez y Olivella, 2009) Se pueden clasificar a los softwares de dos tipos, por un lado, se distinguen las de licencia de distribución (o de comerciales) y, por otra, las licencias libres. A continuación, se hace una descripción de algunos de los softwares más demandados o utilizados en el ámbito profesional de los datos espaciales:

- **ERDAS Imagine:**

Es un software no libre usado principalmente para procesamiento de imágenes satelitales y fotografías aéreas, con una capacidad de procesamiento de datos raster y vectoriales con lenguaje de modelamiento gráfico y visualización en 2D, 3D y composiciones de mapas.

- **ENVI:**

Es un software no libre especializado en el procesamiento de imágenes geoespaciales. Permite realizar un análisis multiespectral de los datos raster basados en ficheros y bandas.

Está escrito en IDL (lenguaje de datos interactivos) que se basan en matrices el cual proporciona un procesamiento de imágenes de forma integrada y enormes capacidades de visualización.

▪ **ArcGis:**

Es un software no libre que permite organizar, gestionar, analizar y compartir información geográfica (raster y vectorial). Entre las herramientas principales se encuentran: *Spatial Analyst*, con la que se crear, consultar y analizar datos raster, combinar datos raster, realizar análisis estadísticos, etc. *3D Analyst*, con el que se pueden crear, visualizar y analizar datos SIG en tres dimensiones y *Geostatistical Analyst*, que permite realizar un análisis geoestadístico, a partir del análisis exploratorio de la información hasta su modelamiento espacial.

▪ **QGIS:**

Es un software libre de código abierto que soporta diferentes formatos y funcionalidades raster y vectoriales, con el que se puede realizar la visualización, edición y análisis de datos SIG. Permite la creación de mapas a través de información raster (celdas) o vectoriales (puntos, líneas y polígonos). Además, permite generar nuevas herramientas bajo lenguajes como C++ y Python.

▪ **SAGA GIS:**

Es un software libre de código abierto que posee un conjunto de algoritmos para el procesamiento y análisis de datos espaciales. Incluye paquetes de geoestadística, clasificación de imágenes, proyecciones, análisis de terreno y simulaciones de procesos dinámicos. Sus módulos permiten realizar trabajos como: reproyección y remuestreo de datos, interpolar y analizar datos raster, manipulación de datos vectoriales, nubes de puntos y geoestadística. Permite acceder a sus funcionalidades a través de líneas en C++.

2.10.3 Análisis de datos satelitales a partir de lenguajes de programación

Rodriguez (2003) indica que un lenguaje de programación es una sintaxis artificial que es utilizada para expresar programas de ordenador, el cual, según el diseño, entiende un cierto grupo de instrucciones elementales. No obstante, existen lenguajes de alto nivel (R, Python, Fortran, C++, etc.) que facilitan el trabajo al no depender del diseño específico del ordenador. La definición de los lenguajes de programación debe contemplar lo siguiente: i) es un grupo de palabras y símbolos clave utilizables, y ii) reglas gramaticales para construir

sentencias a través de una sintaxis (conjunto de reglas que determinan cómo componer las sentencias del lenguaje) y una semántica (interpretación de las sentencias, que señalan el significado de las mismas).

Royé y Serrano (2019) manifiestan que los lenguajes de programación son herramientas fuertes que facilitan el procesamiento de grandes cantidades de datos espaciales, son capaces de extraer y operar con la información, realizar transformaciones o exportar resultados, además de contemplar magníficas funciones de visualización; a través de reglas y un flujo de trabajo con fases que van desde obviar datos en función al tipo de análisis o información que se desea trabajar, hasta la importación y comunicación de estos (Figura 22).

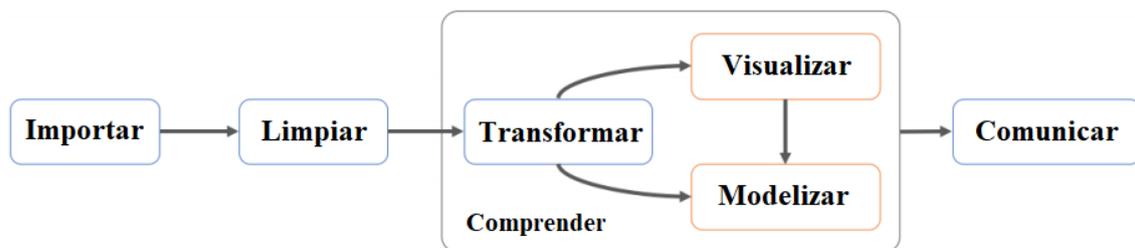


Figura 22: Flujo de trabajo de un lenguaje de programación R

Fuente: Royé y Serrano (2019)

Uno de los lenguajes con un alto nivel en el desarrollo de objetos geoespaciales es R, esto debido a su mayor capacidad de análisis, procesado y visualización de datos desde una perspectiva estadística (algunos de estos se muestran en la Figura 23), R incorpora una serie de librerías que permiten automatizar tareas en cuando a la organización de información espacial (raster y vectorial). Además, R permite trabajar con diferentes tipos de información: desde los más básicos, como los binarios, hasta los de mayor complejidad, como los datos de tipo texto; además de poder generar gráficos de altísima calidad (Estévez, 2018; Royé y Serrano, 2019).

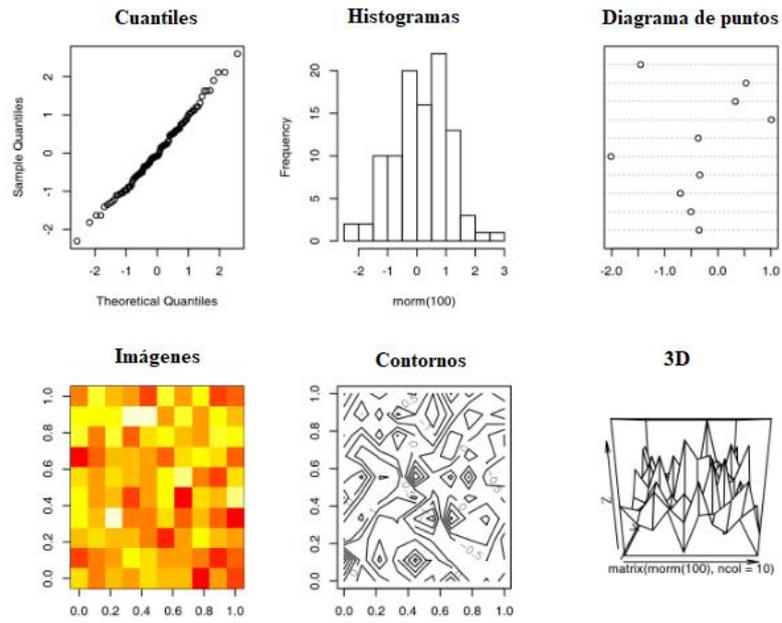


Figura 23: Representación de algunos gráficos que pueden realizarse desde el lenguaje R

Fuente: Tomado del portal web <http://www.imarranz.com/manual.html>

III. METODOLOGÍA

3.1 Materiales

En la presente investigación se han utilizado diferentes tipos de información, se trabajaron con datos obtenidos a partir de sensoramiento remoto MOD09A1 (reflectividad) y STRM (elevación); datos meteorológicos grillados de precipitación (PISCOpV2.1) y temperatura máxima (PISCOtV1.1); datos *SIG* provistos por el MINAM como el registro histórico de incendios forestales, mapa de ecosistemas y la base departamental del Perú.

3.1.1 Datos estimados a partir de sensoramiento remoto

a) Reflectividad de superficie MOD09A1 del satélite Terra

En este trabajo se utilizó el conjunto de datos MOD09A1, que corresponde a los productos de nivel 3, que son datos de valor agregado que provienen de variables geofísicas mapeadas. En algunas ocasiones se ejecutan remuestreos a una menor resolución espacial que el de sus bandas originales y se crean compuestos de intervalos de 1, 8, 16 y 30 días (Mas, 2011).

El producto MOD09A1, provee información de reflectividad de la superficie terrestre en 7 bandas y un conjunto de datos que incluyen bandas para el control de calidad del producto (Tabla 8), a una resolución de 500 m. Este producto es un compuesto de 8 días, donde cada pixel representa la mejor observación de L2G (producto que contienen variables geofísicas generadas a partir de observaciones diarias) durante este tiempo, esto en función a su alta cobertura de observación (*high-observation coverage*), bajo ángulo de visión, presencia de nubes o sombras y cantidad de aerosoles (Vermote, 2015).

Tabla 8: Conjunto de datos del producto MOD09A1

Conjunto de datos científicos	Unidad	Tipo de Dato	Rango de valores	Valor de relleno	Factor de escala	
sur_refl_b01: Refletividad de superficie_Banda1(620- 670 nm)	500m	Reflectividad	16 bit	-100 - 16000	-28672	0.0001
sur_refl_b02: Refletividad de superficie_Banda2(841- 876 nm)	500m	Reflectividad	16 bit	-100 - 16000	-28672	0.0001
sur_refl_b03: Refletividad de superficie_Banda3(459- 479 nm)	500m	Reflectividad	16 bit	-100 - 16000	-28672	0.0001
sur_refl_b04: Refletividad de superficie_Banda4(545- 565 nm)	500m	Reflectividad	16 bit	-100 - 16000	-28672	0.0001
sur_refl_b05: Refletividad de superficie_Banda5(1230- 1250 nm)	500m	Reflectividad	16 bit	-100 - 16000	-28672	0.0001
sur_refl_b06: Refletividad de superficie_Banda6(1628- 1652 nm)	500m	Reflectividad	16 bit	-100 - 16000	-28672	0.0001
sur_refl_b07: Refletividad de superficie_Banda7(2105- 2155 nm)	500m	Reflectividad	16 bit	-100 - 16000	-28672	0.0001
sur_refl_state_500m Banda de Calidad de Estado	Campo de bits	16 bit	NA	65535	NA	

Fuente: Adaptado de Vermote (2015)

La banda de calidad de estado (*state QA*) contiene información sobre el estado del píxel, es decir las características que no dependen de la banda o la resolución del producto. Cada píxel de esta banda contiene información ambiental de caracterización como: tierra, océanos, nubes, aerosol, nieve o fuego, es decir, son datos que reflejan las cualidades del píxel y no la calidad de ninguno de los datos de reflectividad de la superficie. La información contenida en esta capa (*state QA*) se encuentra codificada en sistema binario, de 16 bits por cada píxel y proporcionan información a distintos niveles de detalle y sobre diferentes aspectos (Vermote, 2015).

b) Modelo de elevación digital del *Shuttle Radar Topography Mission* (SRTM)

La Misión Topográfica Shuttle Radas (SRTM por sus siglas en inglés) es un proyecto internacional llevada a cabo por la NASA y las Agencias Espaciales de Italia (ASI) y Alemania (DLR). Son distribuidas por la Sociedad Geológica de Estados Unidos (USGS por sus siglas en inglés) y de libre descarga desde <https://earthexplorer.usgs.gov/>. Los productos son de 90 metros de resolución espacial y cubren todo el globo terráqueo, a su vez existe un modelo de 30 metros de resolución, pero con una menor extensión de cobertura. La técnica utilizada para su generación consistió en la interferometría radar, que consiste en la captura de dos imágenes de radar de un mismo punto desde dos lugares diferentes (Presutti, 2009; Meza, 2019).

3.1.2 Datos meteorológicos

Los datos de precipitación y temperatura máxima a escala diaria y mensual se obtuvieron a partir del producto PISCO (*Peruvian Interpolated data of SENAMHI's Climatological and Hydrological Observations*), tanto para la información de precipitación PISCOp V2.1 (Aybar et al., 2019) y temperatura PISCO V1.1 (Huerta et al., 2018).

a) Producto de precipitación PISCOpV2.1

Es un conjunto de datos de lluvia grillada para todo el Perú, desarrollado para el periodo 1981 hasta el presente con una latencia de 8 semanas en promedio y una resolución espacial de 0.1°, disponible en <https://piscoprec.github.io/>. Fue generado mediante un algoritmo de fusión basado en métodos de interpolación geoestadística y determinista de tres tipos de fuente de precipitación diferentes (Figura 24): i) datos de precipitación de pluviómetros (red de estaciones meteorológicas del SENAMHI), los cuales pasaron por un control de calidad basado en la detección y eliminación de errores graves (datos inconsistentes, valores

extremos y con patrones asimétricos), y un proceso de completación de datos en regiones con escasez de información de pluviómetros; ii) datos precipitación diaria y mensual estimadas a partir de satélite CHIRP (Climate Hazards Group Infrared Precipitation), que, debido a que presenta sobreestimaciones en la costa peruana y no representa de forma adecuada la precipitación sobre la transición entre los Andes y la Amazonía debido a factores orográficos, fue modificado a CHIRPM a partir de la climatología de precipitación basados en la combinación de datos pluviométricos y del iii) radar TRMM 2A25, al considerarse como la fuente de datos de lluvia más adecuada para identificar la variabilidad espacial y patrones estacionales de la precipitación, incluidos para variados puntos de lluvia orográfica como los Andes orientales (Aybar et al., 2019).

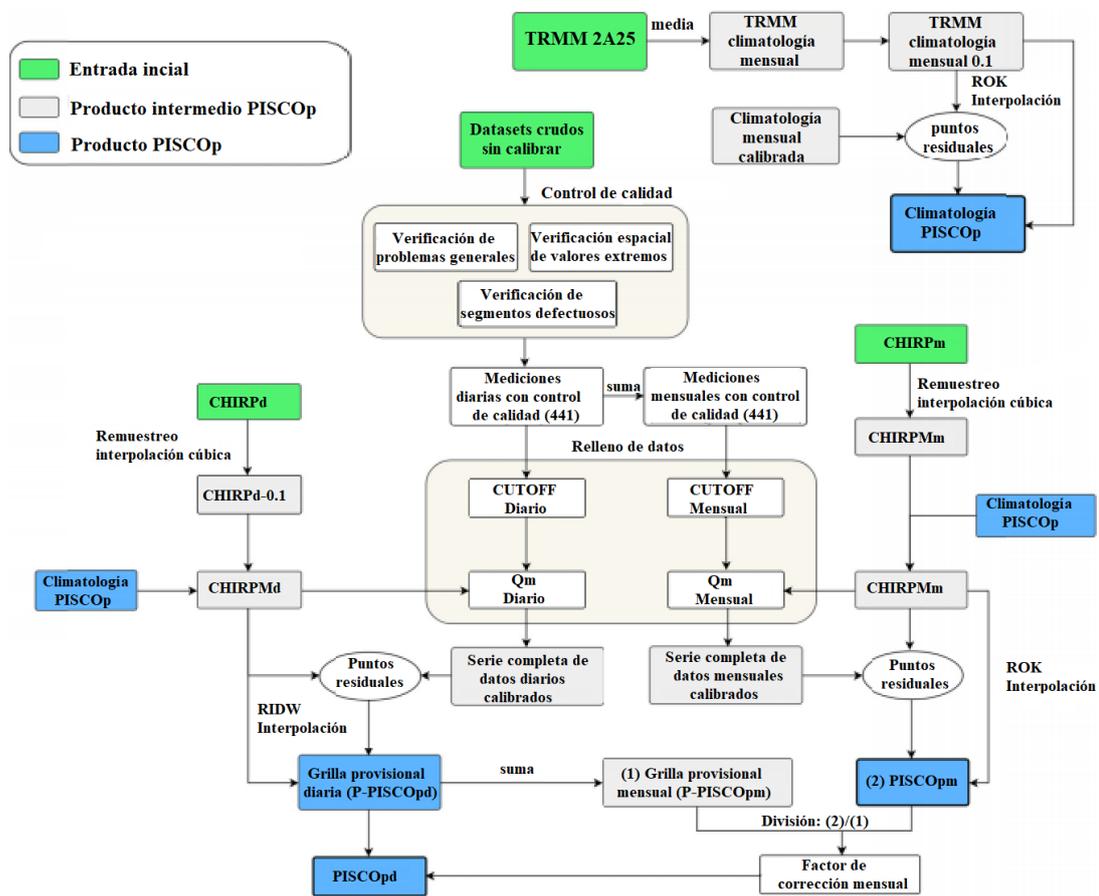


Figura 24: Descripción esquemática del desarrollo de PISCOpV2.1

Fuente: Adaptado de Aybar et al. (2019)

La calidad del producto PISCOV2.1 se evaluó en seis subregiones basados en la heterogeneidad hidroclimática que cuentan con una red de pluviómetros, El análisis de rendimiento muestra que las subregiones Costa del Pacífico (PC) y Andes occidentales (AW) muestran mayor significancia para PISCOV2.1 en comparación con el producto CHIRPM. En estas subregiones PISCOpd (diario) y PISCOpm (mensual) aumentan la precisión del coeficiente de correlación (CC) a 210% y 14% comparado con CHIRPMd (diaria) y CHIRPMm (mensual), respectivamente. Los valores de RMSE indican una reducción constante en el error aleatorio y el PBIAS sistemático se acerca a 0. El rendimiento en las subregiones Andes orientales (AE) y Transición Andes-Amazonía (AAT) de PISCOV2.1 también indica un aumento/disminución sustancial en el CC (RMSE) con respecto a CHIRPM, aunque se encuentran por debajo de AW y PC, lo que puede explicarse por la baja densidad de pluviómetros en esta zona y su variabilidad topográfica. En general, PISCOpm proporciona una mayor precisión respecto a la captura de la influencia de la migración ITCZ en los Andes Tropicales, pese a una notable subestimación de los gradientes de precipitación en la vertiente oriental. En contraste, PISCOpd muestra un bajo rendimiento que no representa alguna mejora respecto a CHIRPMd. Finalmente, la región Amazonía baja (AL) presenta el RMSE más crítico y el CC más bajo en todo el territorio, tanto en el paso de tiempo diario como el mensual, debido a que el número reducido de pluviómetros en el procesamiento de fusión genera inconsistencias a nivel espacial (Aybar et al., 2019)

Las evaluaciones independientes y del balance hídrico muestran que PISCOV2.1 es un producto adecuado para la estimación de lluvia en área, excepto en las tierras bajas del Amazonas. Debe tomarse en cuenta que, el método utilizado para la completación de datos depende en gran medida de la proximidad de los pluviómetros, por lo que se espera que la aplicación en un enfoque de áreas con baja densidad de estaciones pueda conducir a resultados insatisfactorios. Por lo que, pese a tener información grillada espacial y temporal completa (1981-presente), se debe tener cuidado al utilizar PISCOpV2.1 para estudios como el análisis de tendencias, eventos extremos u otros trabajos que se relacionan al cambio climático (Aybar et al., 2019).

b) Producto de temperatura PISCOtV1.1

Es un conjunto de datos grillados que abarca todo el territorio nacional a una escala espacial de 0.1° y temporal diaria y mensual para el periodo 1981-2016, disponible en ftp://publi_dgh2:123456@ftp.senamhi.gob.pe/PISCO_temperatura/. Se generó con base en

la integración de: i) Datos observados de temperatura del aire máxima (Tx) y mínima (Tn) de 684 estaciones climatológicas del SENAMHI, los cuales pasaron por un proceso de control de calidad automático y visual que sigue la metodología de Aguilar et al. (2003) y Hunziker et al. (2018); seguido de un proceso de imputación de la información utilizando datos de temperatura diaria de estaciones y reanálisis del ERA-Interim (Tx y Tn) a través de un modelo estadístico de anomalías estandarizadas; finalmente se realizó un proceso de homogenización utilizando el algoritmo de Menne y Williams (2009) a una escala mensual. En cuanto a las correcciones diarias se hizo una transformación de los factores mensuales a diarios (Vicent et al., 2002). De esta manera, se utilizaron 178 series de tiempo de temperatura máxima y mínima con al menos 15 años de datos que posteriormente se completaron y homogenizaron entre 1981-2016. ii) Producto de temperatura de suelo (LST) del sensor MODIS a una resolución espacial de 1km y temporal de 8 días (MYD11A2) que proporciona una imagen de día y de noche, empleadas como covariables de valores de Tx y Tn. iii) predictores estáticos: Elevación (Z), obtenida del Global Multi-resolución Terrain Elevation Data 2010 a una resolución espacial de 5km (GMTED), Longitud (X), Latitud (Y) y el Índice de Disección Topográfica (TDI), que calcula la altura de la celda en relación con el terreno, a las cuales se hizo un remuestreo a una única resolución espacial de 0.1° (Huerta et al., 2018).

La elaboración de PISCOtV1.1 utiliza un método climatológicamente asistido que implica tres fases principales. En primer lugar, realiza una combinación a escala de normales climatológicas; seguido de una interpolación de anomalías mensuales y diarias empleando la variación mensual de las normales ya mezcladas; finalmente, se obtiene la temperatura máxima y mínima mediante la suma entre la normal grillada y anomalía grillada. La eficiencia en la interpolación de temperatura fue evaluada mediante la validación cruzada o LOOCV (*Leave one out cross validation*), el cual es un método interactivo que excluye un dato de temperatura para cada estación con más de 25 años de información (81 estaciones en total) que finalmente será utilizadas para la validación. Se calculó el error simple (BIAS), error medio absoluto (MAE) y el índice de concordancia (Willmott et al., 2012) para cada iteración LOOCV, agrupados en dos periodos: octubre-marzo (cálido) y abril-setiembre (frío). Respecto a las normales climatológicas se presentaron los valores más altos de MAE en el periodo frío, fundamentalmente en Tx. La distribución y densidad de las estaciones caracterizan mayormente la vertiente occidental de los Andes donde se estiman los valores máximos de MAE en temperatura máxima y mínima al sur y centro. En la Amazonía, la

única estación con un valor similar se presenta al noreste de la región, esto debido a la limitada cantidad de estaciones. Todo esto se representa mejor con el estadístico BIAS en el que se observa la complejidad al estimar la normal de temperatura ($\pm 3^{\circ}\text{C}$). La validación cruzada respecto a los valores mensuales y diarios manifiestan un MAE menor a 1.5°C a escala nacional.

Los resultados muestran el buen rendimiento de la interpolación del producto PISCOtV1.1, además de hacer una caracterización de los puntos de mayor incertidumbre. Aun así, no se puede asumir con certeza si la estimación es certera en las regiones con poca disponibilidad de datos de estaciones meteorológicas y la complejidad orográfica del Perú (Huerta et al., 2018).

SENAMHI (2018) realiza una caracterización espacio-temporal de sequías en regiones altoandinas del Perú para el periodo 1981-2018 en términos de severidad e intensidad con base en el índice estandarizado de precipitación (SPI) utilizando el producto grillado PISCOV2.1, en el cual se identificaron 10 episodios de sequías moderadas a extremas a distintas coberturas espaciales, los cuales se presentaron en los años 1982 (12.9%), 1983 (38.6%), 1985 (21.6%), 1987 (25.1%), 1988 (21.3%), 1990 (71.3%), 1992 (78.5%), 2004 (45.7%), 2005 (25.2%) y 2016 (18.8%).

SENAMHI (2019) realiza un estudio sobre los impactos de sequías sobre la vegetación en los Andes peruanos en el periodo 1982-2015, donde utiliza datos satelitales de NDVI (Índice estandarizado normalizado de vegetación) y datos de precipitación PISCOpV2.1 y temperatura PISCOtV1.1 para la caracterización de sequías por medio del SPEI (Índice estandarizado de precipitación y evapotranspiración). Se identifica que la zona suroriental de los Andes presenta vegetación significativamente sensible a la variabilidad de sequías, principalmente entre abril-junio, siendo los tipos de cobertura más influenciadas las que se ubican en regiones áridas (Bosque seco de montaña, Cardonal y Matorral arbustivo).

Aramayo (2019) utiliza el producto PISCOpV1.2 para estimar la distribución espacial del riesgo de sequía en la región Andina de Puno y así mitigar los impactos de los eventos extremos en los Andes de este departamento. El peligro de sequía se cuantifica por medio del SPI a una escala de 3 meses; la vulnerabilidad se obtuvo en función a las características socioeconómicas y físicas de la región puneña. Se generaron mapas a nivel de Unidades Hidrográficas de peligro, vulnerabilidad y riesgo de sequías, en el cual se presentaron riesgos

con categoría alto y muy alto hasta en 50% de las cuencas ubicadas geográficamente al norte, centro y suroeste de la región, el cual representa el 82% del área del departamento.

Aucahuasi (2019) con el objetivo de evaluar las tendencias de precipitación y temperatura en la ciudad de Puerto Maldonado, Perú en el periodo 1970-2017 complementa la información meteorológica de la estación Puerto Maldonado con los datos de precipitación PISCOpV2.0 y temperatura PISCOtV1.0 en el periodo 1981-2015. Realiza un análisis de regresión lineal y de tendencia mediante la prueba Mann-Kendall y la prueba de Pettitt para estimar los probables años de cambio en las tendencias climatológicas. Como resultado encuentra una tendencia positiva significativa de 0.47°C (temperatura media), 0.44°C (temperatura máxima) y 0.49°C (temperatura mínima), mientras que la precipitación no presenta alguna tendencia significativa.

3.1.3 Datos SIG

a) Registro histórico de incendios forestales

El Ministerio del Ambiente por medio de la Dirección de Ordenamiento Territorial Ambiental (DGOTA), en colaboración con las entidades competentes, tiene el objetivo de evaluar y monitorear los ecosistemas a nivel nacional. En este marco ha elaborado un registro de incendios en términos de dónde, cuándo y la frecuencia en que se presentan los incendios (<http://geoservidor.minam.gob.pe/monitoreo-y-evaluacion/registros-historicos-cfoi/>). Este registro tiene información desde el año 2000 y se viene actualizando permanentemente a través de una metodología que inicia con la revisión de los reportes diarios de emergencia del Sistema de Información Nacional para la Respuesta y Rehabilitación (SINPAD – INDECI), esta información es verificada por medio de reportes periodísticos, publicación en redes sociales o información brindada por los gobiernos locales y regionales. A partir de esto se ubica el evento a través de la georreferenciación con imágenes satelitales que también son utilizados para el análisis visual de los patrones espectrales y espaciales que caracterizan a los incendios. Asimismo, se analiza la información de los focos de calor y el análisis temporal de las áreas afectadas a través de imágenes satelitales por medio de un análisis multitemporal, donde se utilizan imágenes satélites provenientes de los sensores MODIS, AVHRR y VIIRS. Finalmente, estos datos generados son cargados a una base de datos que pueden ser descargados de manera libre desde el Geoservidor del MINAM en un formato *shapefile* (MINAM, 2019).

b) Mapa nacional de ecosistemas

Los ecosistemas son asociaciones dinámicas entre comunidades vegetativas, animales, microorganismos y el medio abiótico donde interactúan como una unidad funcional. Son parte del patrimonio nacional y proporcionan bienes y servicios a la comunidad. Sin embargo, factores antrópicos (sociodemográficos, económicos y políticos) vienen perjudicando los servicios ecosistémicos. Ante esta situación, el Ministerio del Ambiente en el 2019 publica el Mapa Nacional de Ecosistemas del Perú (<https://sinia.minam.gob.pe/mapas/mapa-nacional-ecosistemas-peru>) con el fin mejorar la gestión del territorio y monitoreo de ecosistemas. Se ha logrado mapear la distribución espacial de 11 ecosistemas en la región selva tropical, 3 en la región yunga, 11 en la región andina, 9 en la región costa y 2 ecosistemas acuáticos. La metodología utilizada para su elaboración consistió en tres pasos: i) elaboración de la leyenda, en la que se tomó como base la información cartográfica existente en el Mapa Ecológico del Perú (ONERN, 1976), el Mapa de Cobertura Vegetal del Perú (MINAM, 2012), el Mapa de Cobertura Vegetal del Perú (MINAM, 2015), Mapa de Provincias Biogeográficas del Perú (CDC-UNALM, 1991; Rodríguez, 1996), Mapa Forestal del Perú (INRENA, 1996), el Inventario de Lagunas y Represamientos (ONERN, 1980), el Mapa de Humedales (ANA-MINAM, 2012) y la información de vegetación generada en los documentos de Zonificación Ecológica y Económica; ii) construcción cartográfica del mapa, donde se utilizó la cartografía del Instituto Geográfico Nacional (IGN) a una escala 1:100 000, referenciados a un sistema de coordenadas planas proyectadas en Universal Transversal de Mercator (UTM) referidas a la zona 18 y el Datum WGS-84; iii) proceso de validación, donde se determina el nivel de confianza del mapa a través de las medidas de precisión, exactitud y error, considerando información en campo (puntos aleatorios de muestreo) e información primaria (trabajos en campo), secundaria (coordenadas-*shapefiles*) y de satélite (SPOT, Rapideye, Google Earth y Landsat), el análisis de exactitud se hizo mediante el contraste de toda la información con el cálculo de la matriz de confusión. Los resultados presentan un alto grado de concordancia, lo que otorga confiabilidad a la cartografía del Mapa Nacional de Ecosistemas del Perú (MINAM, 2019).

c) Límites departamentales y de cuencas hidrográficas

El Ministerio del Ambiente, a través del geoservidor dispone de información de diferentes archivos *shapefile* (<http://geoservidorperu.minam.gob.pe/geoservidor/download.aspx>) a fin de ser utilizada para los análisis espaciales, en forma libre. En este estudio se hace uso de

los *shapefiles* de Límite Departamental, Fuente: INEI-2007 (<http://geoservidorperu.minam.gob.pe/geoservidor/download.aspx>) y de Cuencas Hidrográficas, Fuente: ANA-2009 (<http://geoservidorperu.minam.gob.pe/geoservidor/download.aspx>)

3.2 Metodología

La metodología desarrollada en el presente trabajo consistió en las siguientes etapas: preparación de datos, evaluación de datos de incendios, análisis de variables climáticas y vegetativas, análisis de eventos de sequías y evaluación de parámetros climáticos.

3.2.1 Preparación de datos

a) Datos de reflectividad MOD09A1

Los productos de reflectividad MOD09A1, pese a ser compuestos de 8 días, pueden presentar píxeles con valores erróneos debido a la presencia de nubes, aerosoles, sombras, cuerpos de agua, etc., incluso por un mal funcionamiento del sensor, lo que termina afectando directamente el registro radiométrico por parte de esta; incluso se pueden llegar a obtener diferencias radiométricas en píxeles que corresponden al mismo tipo de cobertura, lo que pueden conducir a errores de clasificación de la cobertura o en la estimación de los índices (Cihlar, 2000; Bisquert et al., 2009), por lo que es necesario realizar un proceso de filtrado a partir de las banda de calidad (“sur_refl_state_500m” y “sur_refl_qc_500m”). Una variación en la información de reflectividad se debe a las propiedades BRDF (función de distribución de reflectividad bidireccional, por sus siglas en inglés) o albedo en dóseles desiguales; dado que, se presentarán sombras menores en las tomas de píxeles de bosques ubicados en el extremo oeste del barrido durante la mañana, a diferencia de las que se encuentran al extremo este. El porcentaje de sombras afecta directamente al albedo y con ello la reflectividad tomada en el pixel, al generarse manchas artificiales (Felicísimo y García-Manteca, 1990).

Para poder reducir los efectos que estas fuentes de error puedan generar sobre los datos de reflectividad, además de una correcta evaluación de la actividad fotosintética, en este trabajo se utilizó únicamente la banda **sur_refl_state_500m** para el filtro de calidad de los píxeles, al considerarse suficientes según la bibliografía consultada. (Hess et al., 2009; Colditz et al., 2006, Reinart et al., 2008), quienes sugieren que aplicar un filtrado muy restrictivo provoca

una muy alta proporción de información eliminada, lo que genera un sesgo en la serie de datos.

Los filtros utilizados se resaltan en negrita en la Tabla 9, se consideraron aquellos que garanticen la calidad de los datos de los píxeles (estado de nubes, sombras de nubes, tierra/agua, cantidad de aerosol, nube cirrus detectada, algoritmo interno de nubes, MOD35 nieve/hielo, corrección BRDF realizada y máscara de nieve interna) para todas las bandas del producto MOD09A1.

Tabla 9: Descripción del control de calidad QA state – 16 bits (se resalta los filtros utilizados en este estudio)

Bit N°	Nombre del Parámetro	Comb. Bit	Estado de la Reflectividad de la Superficie-500M / Estado de la data QA
		00	Limpio
0-1	Estado de la Nube	01	Nublado
		10	Mixto
		11	Se asume limpio
2	Sombras de Nubes	1	Si
		0	No
		000	Océano poco profundo
		001	Tierra
		010	Costas Oceánicas y Costas de Lagos
		011	Sombra de aguas Continentales
3-5	Suelo / Agua	100	Agua Efímera
		101	Aguas Interiores Profundas
		110	Continental / Océano Moderado
		111	Océano Profundo

		00	Climatología
6-7	Cantidad de Aerosol	01	Bajo
		10	Promedio
		11	Alto
		00	Ninguno
8-9	CIRRUS Detectado	01	Pequeño
		10	Promedio
		11	Alto
10	Logaritmo interno para detectar nubes	1	Nubes
		0	Sin Nubes
11	Logaritmo interno para detectar incendios	1	Fuego
		0	Sin Fuego
12	MOD35 nieve/hielo	1	Si
		0	No
13	Pixel adyacente a la nube	1	Si
		0	No
14	Corrección de BRDF realizada	1	Si
		0	No
15	Máscara interna de nieve	1	Nieve
		0	Sin Nieve

Fuente: Adaptado de Vermote (2015)

3.2.2 Evaluación de datos de incendios forestales

La evaluación de datos de incendios se hizo de forma independiente para Cajamarca y Cusco. Se generó la serie histórica anual con la finalidad de identificar los años donde se registraron el mayor número de eventos en estos departamentos.

Se contrastaron los *shapefiles* del mapa nacional de ecosistemas y los puntos de incendios forestales para cada departamento. A partir de esto se hizo una clasificación de los tipos de vegetación más afectados por la frecuencia de estos eventos, así como el análisis de su distribución espacial y temporal.

Se extrajo la cota de cada punto de incendio forestal utilizando el modelo de elevación, con el que se hizo un análisis de distribución mensual a lo largo de intervalos de altitud para poder identificar el rango de elevación de la ocurrencia de incendios, según el tipo de cobertura vegetal. A partir de esto se hizo una regionalización de la zona andina donde predomina la ocurrencia de incendios en Cajamarca y Cusco.

3.2.3 Análisis de variables climáticas y vegetativas

a) Evaluación de variables de precipitación y temperatura

Se generaron series temporales promedio de precipitación (PISCOp) y temperatura máxima (PISCOt), tanto para Cajamarca como para Cusco, siguiendo estos pasos: i) Clasificación de cada punto de incendio forestal en función al tipo de vegetación que afectó para cada departamento. ii) Extracción de los datos (mensual y diaria) climáticos por punto de incendio forestal para cada tipo de vegetación. iii) Finalmente se obtuvo la serie de tiempo (1981-2016) de precipitación y temperatura máxima, promediando los datos calculados anteriormente (agrupados por cobertura vegetal).

b) Evaluación de variables vegetativas

Se calcularon escenas (cada 8 días) de índices espectrales, con base en el producto de reflectividad MOD09A1, que se aproximen al comportamiento estacional de la vegetación (actividad fotosintética y concentración de humedad), con la finalidad de estimar patrones vegetativos previos a los meses con alta frecuencia de incendios en las regiones de Cajamarca y Cusco. Se generaron series temporales (2002-2016) con valores promedios de cada índice (agrupados por vegetación) siguiendo los mismos pasos que los promedios de las variables climáticas. Estos índices espectrales se describen a continuación:

El Índice de Vegetación de Diferencia Normalizada (NDVI) (Rouse et al.,1974)

Se fundamenta en el particular comportamiento radiométrico de la planta, relacionado con la estructura foliar y la actividad fotosintética de la vegetación que permite estimar su vigorosidad por medio de sus valores normalizados (-1 a +1). Las condiciones durante su período vegetativo. Su cálculo, a partir del producto de reflectividad MOD09A1, se basa en el cociente normalizado entre la banda 1 (RED, $0.62\mu m - 0.67\mu m$) y banda 2 (NIR, $0.841\mu m - 0.876\mu m$).

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

Donde ρ_{λ} representa la reflectividad en diferentes rangos de longitudes de onda.

El Índice de Agua de Diferencia Normalizada (NDWI) (Gao, 1996)

Este índice se basa en la concentración de las moléculas de agua líquida que interactúan con la energía solar que incide sobre la planta, por lo que es considerado como uno de los mejores índices para estimar el estado de humedad de la vegetación y el suelo. Para su cálculo se utilizan los datos de reflectividad absoluta en los rangos del infrarrojo cercano (NIR, 0.86 μm promedio) e infrarrojo de onda corta (SWIR, 1.24 μm promedio). Según lo indicado por Gao (1996), para el cálculo del NDWI a partir de datos MOD09A1, se deberían de tomar en cuenta las bandas del infrarrojo cercano e infrarrojo de onda corta en los rangos de 0.841 μm - 0.876 μm y 1.23 μm - 1.25 μm respectivamente. Sin embargo, estos devuelven valores negativos y cercanos a cero, por lo que se decidió reemplazar la banda del SWIR entre los 1.23 μm - 1.25 μm por la reflectividad entre los 2.105 μm - 2.155 μm , según lo sugerido por Gu, Brown, Verdin, & Wardlow (2007).

$$\text{NDWI} = \frac{\rho_{\text{NIR}} - \rho_{\text{SWIR}}}{\rho_{\text{NIR}} + \rho_{\text{SWIR}}}$$

Los valores de NDWI para el espectro de la vegetación vigorosa y seca son positivos (0.064 en promedio) y negativos (-0.056 en promedio) respectivamente; asimismo, para casi la totalidad de los suelos, tanto húmedos como secos, los valores asumidos son negativos. Por otra parte, valores de NDWI tan altos como 0.63, generalmente hacen referencia a cuerpos de agua.

El Índice de Vegetación Ajustado al Suelo (SAVI) (Huete, 1988)

Este índice presenta una técnica de transformación para reducir las influencias del brillo del suelo a partir del NDVI que involucra la reflectividad de la banda roja (RED, 0.62 μm - 0.67 μm) y el infrarrojo cercano (NIR, 0.841 μm - 0.876 μm). Gráficamente, la modificación implica un cambio del origen de los espectros de reflectividad trazados en el espacio de longitud de onda NIR - RED para tener en cuenta las interacciones de primer orden entre la vegetación y el suelo y la extinción diferencial del flujo en las mismas longitudes de onda a través de las cubiertas con vegetación. Incorpora un factor L a la ecuación del NDVI, que

dependerá de la densidad del dosel, y además varía con las características de reflectividad del suelo (humedad, color, brillo, etc.).

$$SAVI = \frac{\rho_{NIR} - \rho_{RED}}{\rho_{NIR} + \rho_{RED}} \times (1 + L) \quad ; \quad L = 0.25$$

El Índice de Vegetación Mejorado (EVI) (Huete et al., 2002)

Es un índice de vegetación optimizado diseñado para mejorar la señal de la vegetación con una sensibilidad mejorada en regiones con biomasa densa y un mejor control de la vegetación a través de un desacoplamiento de la señal de fondo del dosel y una disminución de las influencias de la atmósfera

$$EVI = G \times \frac{\rho_{NIR} - \rho_{RED}}{\rho_{NIR} + (C_1 \times \rho_{RED}) - (C_2 \times \rho_{BLUE}) + L}$$

Donde la reflectividad en las longitudes de onda del NIR (0.841µm – 0.876µm), RED (0.62µm – 0.67µm) Y BLUE (0.459µm – 0.479µm) están completa o parcialmente corregidos por los efectos atmosféricos (absorción de Rayleigh y ozono); L es el ajuste de fondo del dosel que aborda la transferencia no radiante, diferencial NIR y radiante rojo a través de un dosel; C₁ y C₂ son los coeficientes del término de resistencia al aerosol, que utiliza la banda azul para corregir las influencias del aerosol en la banda roja. Para los índices EVI calculados a partir de MODIS se utilizan; L = 1, C₁ = 6, C₂ = 7.5 y G (factor de ganancia) = 2.5.

El Índice Infrarrojo de Diferencia Normalizada (NDII) (Hunt y Rock, 1989)

Este índice es una medida de reflectividad que es sensible a los cambios en la cantidad de agua de las copas de las plantas. Se calcula a partir de la diferencia normalizada de la reflectividad en los rangos de longitudes de onda del NIR (0.841µm – 0.876µm) y SWIR (1.628µm – 1.652µm), incrementos el contenido de agua aumentan su valor, siendo ampliamente usado para monitorear el espesor de agua equivalente (EWT) de las hojas y el dosel.

$$NDII = \frac{\rho_{NIR} - \rho_{SWIR}}{\rho_{NIR} + \rho_{SWIR}}$$

El Índice Global de Monitoreo Ambiental (GEMI) (Pinty y Verstraete, 1992)

La mayoría de los índices son sensibles a los efectos atmosféricos. La corrección de los datos recolectados por los satélites respecto a los efectos atmosféricos es posible, pero es necesario contar con información sobre la composición de la atmósfera en el instante de la toma de la escena. GEMI propone un nuevo índice de vegetación diseñado específicamente para reducir los efectos relativos de estas perturbaciones indeseables, manteniendo la información sobre la cubierta vegetal.

Guarda similitud con el NDVI, pero es menos sensible a los efectos atmosféricos, sus valores oscilan entre 0 y 1. Se ve afectado por el suelo desnudo; por lo tanto, no se recomienda su uso en áreas de vegetación escasa o moderadamente densa.

$$\text{eta} = \frac{2 \times (\rho_{\text{NIR}}^2 - \rho_{\text{RED}}^2) + (1.5 \times \rho_{\text{NIR}}) + (0.5 \times \rho_{\text{RED}})}{\rho_{\text{NIR}} + \rho_{\text{RED}} + 0.5}$$
$$\text{GEMI} = \text{eta} \times (1 - (0.25 \times \text{eta})) - \frac{\rho_{\text{RED}} - 0.125}{1 - \rho_{\text{RED}}}$$

El Índice Global de Humedad de la Vegetación (GVMI) (Ceccato, Flasse y Grégoire, 2002)

Es un índice que intenta estimar la concentración de agua en las plantas a partir de datos detectados por sensores remotos en el dominio del espectro electromagnético. Este índice emplea un análisis de sensibilidad global que utiliza modelos de transferencia radiativa para cuantificar los efectos del contenido de humedad en la vegetación medida en tres niveles (hoja, dosel y atmósfera), optimizando la recuperación del contenido de agua de las plantas (en términos de cantidad de agua por unidad de área a nivel del dosel) y minimiza los efectos perturbadores de los efectos geofísicos y atmosféricos. Sus valores se encuentran en el rango de 0.0 y 0.9. Se calcula a partir de los valores de reflectividad en los rangos del infrarrojo cercano (NIR, 0.841µm – 0.876µm) e infrarrojo de onda corta (SWIR, 1.628µm – 1.652µ).

$$\text{GVMI} = \frac{(\rho_{\text{NIR}} + 0.1) - (\rho_{\text{SWIR}} + 0.02)}{(\rho_{\text{NIR}} + 0.1) + (\rho_{\text{SWIR}} + 0.02)}$$

El Índice de Resistencia Atmosférica Visible (VARI) (Gitelson et al., 2002)

Es un índice diseñado para resaltar la vegetación en la parte visible del espectro electromagnético, a la vez que reduce las diferencias en la iluminación y los efectos atmosféricos. Resulta idóneo para analizar la vegetación en todas las etapas de su

crecimiento. Se calcula a partir de los valores de reflectividad en los rangos del rojo (RED, 0.62 μ m – 0.67 μ m), azul (BLUE 0.46 μ m – 0.48 μ m) y verde (GREEN, 0.55 μ m – 0.57 μ m)

$$\text{VARI} = \frac{\rho_{\text{GREEN}} - \rho_{\text{RED}}}{\rho_{\text{GREEN}} + \rho_{\text{RED}} - \rho_{\text{BLUE}}}$$

c) Análisis de variables estadísticas

Se creó una máscara a partir del modelo de elevación digital para la región andina de Cajamarca y Cusco con el que se obtuvo promedios mensuales por área para cada índice de vegetación

Se analizó la tendencia de la evolución interanual de la vegetación a partir de los valores medios mensuales de diferentes índices espectrales a partir de la prueba de Mann-Kendall, el cual es una prueba no paramétrica y permite identificar cambios en series de datos (Kendall, 1975; Mann, 1945). Esta prueba se basa en la comparación entre los valores que conforman una misma serie temporal de manera secuencial (Silva, 2007). Ha sido ampliamente utilizado en diferentes campos de las ciencias naturales por su capacidad de extracción de tendencias confiables, aún sin un alto número de muestras, y tolerancia al ruido (Miró et al., 2009).

La prueba de Mann-Kendall se representa de la siguiente forma:

$$S = \sum_{i=1}^{n-1} \left[\sum_{j=i+1}^n \text{sgn}(R_j - R_i) \right]$$

Donde:

$$\text{sgn}(x) = 1 \text{ para } x > 0$$

$$\text{sgn}(x) = 0 \text{ para } x = 0$$

$$\text{sgn}(x) = -1 \text{ para } x < 0$$

Para que la hipótesis nula (H_0) sea verdadera, S debe aproximarse a la distribución normal, media cero y una variancia $\text{Var}(S) = (n(n-1)(2n+5))/18$. El resultado de S señala la posible tendencia desde que este valor sea significativamente distinta de cero. Si S es diferente de

cero, (H_0) puede ser rechazada y la hipótesis alternativa (H_1) sería aceptada. El estadístico para esta prueba está representado por Z , el cual se expresa de esta forma:

$$Z = \begin{cases} \frac{S - 1}{(\text{Var}(S))^{1/2}} ; & S > 0 \\ 0 & ; S = 0 \\ \frac{S + 1}{(\text{Var}(S))^{1/2}} ; & S < 0 \end{cases}$$

Para probar la tendencia de una serie (creciente o decreciente), para un nivel de significancia α , se rechaza H_0 cuando el valor absoluto de Z sea mayor a $Z_{1 - \alpha/2}$. Para un nivel de significancia $\alpha = 0.05$ la descripción de significancia de la prueba de Mann-Kendall se describe en la Tabla 10.

Tabla 10: Descripción de significancia de la prueba Mann-Kendall para $\alpha = 0.05$

Significancia	Simbología	Z
Sin tendencia	ST	0
Tendencia significativa creciente	TSC	$> +1.96$
Tendencia significativa decreciente	TSC	< -1.96
Tendencia no significativa creciente	TNSC	$< +1.96$
Tendencia no significativa decreciente	TNSD	> -1.96

Fuente: Alves et al. (2015)

Se hace una evaluación de los impactos sobre la vegetación de las sequías en los años 2005, 2010 y 2016 en la región andina y amazónica a través de la caracterización de anomalías de vegetación durante parte de la época seca (julio-setiembre), debido a que en regiones donde la estructura de la cobertura no presenta perturbaciones drásticas normalmente, las alteraciones pueden ser atribuidas a la respuesta de la vegetación ante eventos de este tipo (Tiedeaman et al., 2010; Durante, 2016). El análisis de anomalías se hace a partir de la siguiente expresión:

$$a = \frac{(x - m)}{s}$$

Donde, a es la anomalía estandarizada del índice espectral, x es el año específico del que se quiere obtener la anomalía, m es la media histórica de la serie de tiempo y s es la desviación estándar de la serie de tiempo (Xu et al., 2011).

La clasificación sobre la categorización de las anomalías estandarizadas del NDVI se muestra en la Tabla 11:

Tabla 11: Categorización de anomalías estandarizadas de NDVI

Valor	Categoría
Superávit extremo	mayor que 3
Superávit moderado	entre 3 y 2
Superávit ligero	entre 2 y 1
Normal	entre 1 y -1
Déficit ligero	entre -1 y -2
Déficit moderado	entre -2 y -3
Déficit extremo	menor que -3

Fuente: Adaptado de Climate Data Library (ana.gob.pe)

3.2.4 Análisis de eventos de sequías

Se calculó el SPI, a nivel de pixel, a diferentes escalas temporales, a partir del producto grillado de precipitación mensual PISCOpV2.1 y las geometrías de cada región. El índice estandarizado de precipitación (SPI, por sus siglas en inglés) fue desarrollado por Mckee et al. (1993) para cuantificar el déficit de precipitación en distintas escalas temporales, las cuales muestran el efecto de la sequía en el suministro de los diferentes recursos hídricos. El SPI utiliza la precipitación como variable única de análisis con el que estima si en una región, en un periodo determinado, existe déficit o exceso de lluvias respecto a las condiciones normales (Hayes et al., 1999); para lo cual se recomienda tener por lo menos un registro de 30 años (Wu et al., 2005). Este índice se calcula ajustando una función de distribución de probabilidad, generalmente Gama, que luego es transformada a una distribución normalizada, de manera que la humedad y la sequía puedan ser comparados a través de diferentes regiones (Qin et al., 2015). Resultado del ajuste y la transformación, cada valor numérico del SPI equivale al número de desviaciones estándares medidas de una función de distribución de probabilidad dada (SENAMHI, 2019). En este trabajo se utilizaron el SPI3 y SPI6, los cuales ofrecen una comparación de la precipitación dentro de un periodo

específico de 3 y 6 meses, respectivamente, con los totales de precipitación para un mismo periodo de 3 y 6 meses, respectivamente, de toda la serie histórica de datos.

(SENAMHI, 2019) Suponiendo que x representa la precipitación acumulada mensual en la escala de tiempo del estudio (1 mes, 3 meses, 12 meses, etc.), la cual se ajusta a una función de densidad de probabilidad $g(x)$:

$$g(x) = \frac{x^{\alpha-1} e^{-x/\beta}}{\beta^\alpha \Gamma(\alpha)}, x > 0 \quad ; \quad \Gamma(x) = \int_0^\infty x^{\alpha-1} e^{-x} dx$$

$\Gamma(x)$ es la función gamma, α es el parámetro de forma y β el parámetro de escala, que pueden ser estimados por el método de máxima verosimilitud (Guttman, 1999):

$$\alpha = \frac{1 + \sqrt{1 + 4A/3}}{4A}, \beta = \frac{x}{\alpha} \quad A = \ln(\hat{x}) + \frac{\sum \ln(x)}{n}$$

Donde n indica la longitud de la serie temporal (meses). La probabilidad acumulada de precipitación x en la escala de tiempo dada se expresa de la siguiente forma:

$$G(x) = \int_0^x g(x) dx = \frac{1}{\beta^\alpha \Gamma(\alpha)} \int_0^x x^{\alpha-1} e^{-x/\beta} dx$$

Si $t=x/\beta$, la ecuación anterior se transforma en una función gamma incompleta:

$$G(x) = \frac{1}{\Gamma(\alpha)} \int_0^x t^{\alpha-1} e^{-t} dt$$

Gamma no está definida para $x=0$, y las series de precipitación pueden presentarse con valores de cero, entonces la probabilidad acumulada puede calcularse como (Angelidis et al., 2012):

$$H(x) = q + (1 - q)G(x)$$

Donde q es la probabilidad de $x=0$, es decir, la frecuencia de ocurrencia de $x=0$ en todas las series observadas. Cuando son transformadas en la función de distribución estandarizada normal, el SPI se expresa como:

$$SPI = \begin{cases} -\left(t - \frac{c_0+c_1+c_2t^2}{1+d_1t+d_2t^2+d_3t^3}\right), & t = \sqrt{\ln\left(\frac{1}{H(x)^2}\right)}, \quad 0 < H(x) \leq 0.5 \\ t - \frac{c_0+c_1+c_2t^2}{1+d_1t+d_2t^2+d_3t^3}, & t = \sqrt{\ln\left(\frac{1}{(1-H(x))^2}\right)}, \quad 0.5 < H(x) \leq 1 \end{cases}$$

Donde las constantes son iguales a: $c_0=2.515517$, $c_1=0.802853$, $c_2=0.010328$, $d_1=1.432788$, $d_2=0.189269$ y $d_3=0.001308$.

Un episodio de sequía ocurre cuando, durante cualquier escala de tiempo, el SPI presenta valores negativos de manera continua y alcance una intensidad de -1 o menor, finalizando cuando el SPI llega a ser positivo (McKee et al., 1993, SENAMHI, 2019). La identificación de las sequías meteorológicas por medio del SPI propuestos por el OMM a través de umbrales, los cuales se muestra en la Tabla 12:

Tabla 12: Clasificación de las condiciones de sequía según SPI

Índice	Categoría
-2.0 y menor	Extremadamente seco
-1.5 a -1.99	Severamente seco
-1.0 a -1.49	Moderadamente seco
-0.99 a 0.99	Normal
1.0 y mayor	Húmeda

Fuente: Adaptado de OMM (2012)

3.2.5 Evaluación de parámetros climáticos

Espinoza et al. (2016) realiza un estudio en la cuenca andina-amazónica Tamshiyacu, donde determina que parámetros climáticos como la frecuencia de días secos estarían mejor correlacionados ($r=-0.95$; $p < 0.0001$) al índice espectral NDVI. SENAMHI (2018) indica que entre los principales factores meteorológicos que favorecieron a la propagación del fuego en el 2016, principalmente en regiones andinas, se encuentra la frecuencia en que se presentaron días sin lluvia, precipitaciones acumuladas anómalas y temperaturas máximas por encima del promedio de manera consecutiva durante días previos a la evolución de los

incendios forestales. IGP (2020) señala que el aumento de la frecuencia de días secos en los Andes peruanos es consistente con la ocurrencia de sequías y el incremento, en hasta el 400%, de los reportes por incendios forestales en regiones entre los 1500 y 4000 msnm. Por lo tanto, el monitoreo de los parámetros climáticos serían prácticos para inferir impactos de las sequías sobre la vegetación y el posterior incremento severo de incendios que se presenta ante un aumento del déficit de humedad en la vegetación, el suelo y la atmósfera, los cuales permiten que el fuego producido en las quemas agropecuarias, principalmente, se expandan con facilidad sobre los ecosistemas naturales.

A partir de la serie temporal diaria (para cada tipo de cobertura) de precipitación y temperatura máxima en Cajamarca y Cusco, calculada anteriormente, se estimaron parámetros climáticos como la precipitación acumulada (PA), frecuencia acumulada de días secos (DDF, por sus siglas en inglés) y frecuencia acumulada de días calurosos (HDF, por sus siglas en inglés). Se ha establecido los umbrales de días secos y días calurosos por medio de la distribución mensual por deciles de precipitación y temperatura máxima. Los valores de precipitación diaria por debajo del primer decil respecto a un mes en específico son considerados como un día seco, mientras que los valores de temperatura máxima diaria por encima del noveno decil, son considerados como un día caluroso.

IV. RESULTADOS Y DISCUSIÓN

4.1 Regímenes climáticos en el departamento de Cajamarca y Cusco

Con el fin de definir el ciclo anual de las variables climáticas en cada región, se generaron promedios de precipitación acumulada mensual y temperaturas máximas durante el periodo 2002-2016 (Figura 25). Para Cajamarca, ubicada al norte de los Andes peruanos, se obtuvo, en promedio, 9 mm de precipitación acumulada en el mes de agosto, el cual representa el mínimo anual de la región; la máxima precipitación corresponde al mes de marzo, siendo este un valor de 161 mm; la temperatura máxima tiende a aumentar desde enero, alcanzando su máximo en noviembre con un valor de 24 °C en promedio. Asimismo, en Cusco, ubicada al sur de los Andes peruanos, la precipitación mínima del año se presenta en el mes de junio, alcanzando un acumulado de 22 mm, aproximadamente, mientras que la mayor fue de 284 mm, correspondiente a febrero; similar a lo que ocurre en Cajamarca, en Cusco la temperatura máxima se presenta en noviembre, con un valor de 23 °C en promedio. Estos resultados coinciden con lo mencionado por Garreaud et al. (2009) y SENAMHI (2016), quienes describen que el clima en la sierra está influenciado principalmente por la latitud, altitud, existencia de vientos locales y el efecto pantalla que ejerce la cordillera, lo que da lugar a una disminución de la temperatura al aumentar la altitud y una disminución de precipitación de norte a sur y de oeste a este.

En general, los regímenes climáticos en Cajamarca y Cusco siguen un mismo patrón mensual de precipitación y temperatura máxima, por lo que en este estudio la temporada de estiaje, inicio de la temporada de lluvias y la temporada de lluvias, serán considerada entre los meses de mayo-setiembre, octubre-diciembre y enero-abril, respectivamente; coherente con lo indicado en trabajos realizados por SENAMHI (2017) y Accostupa (2017).

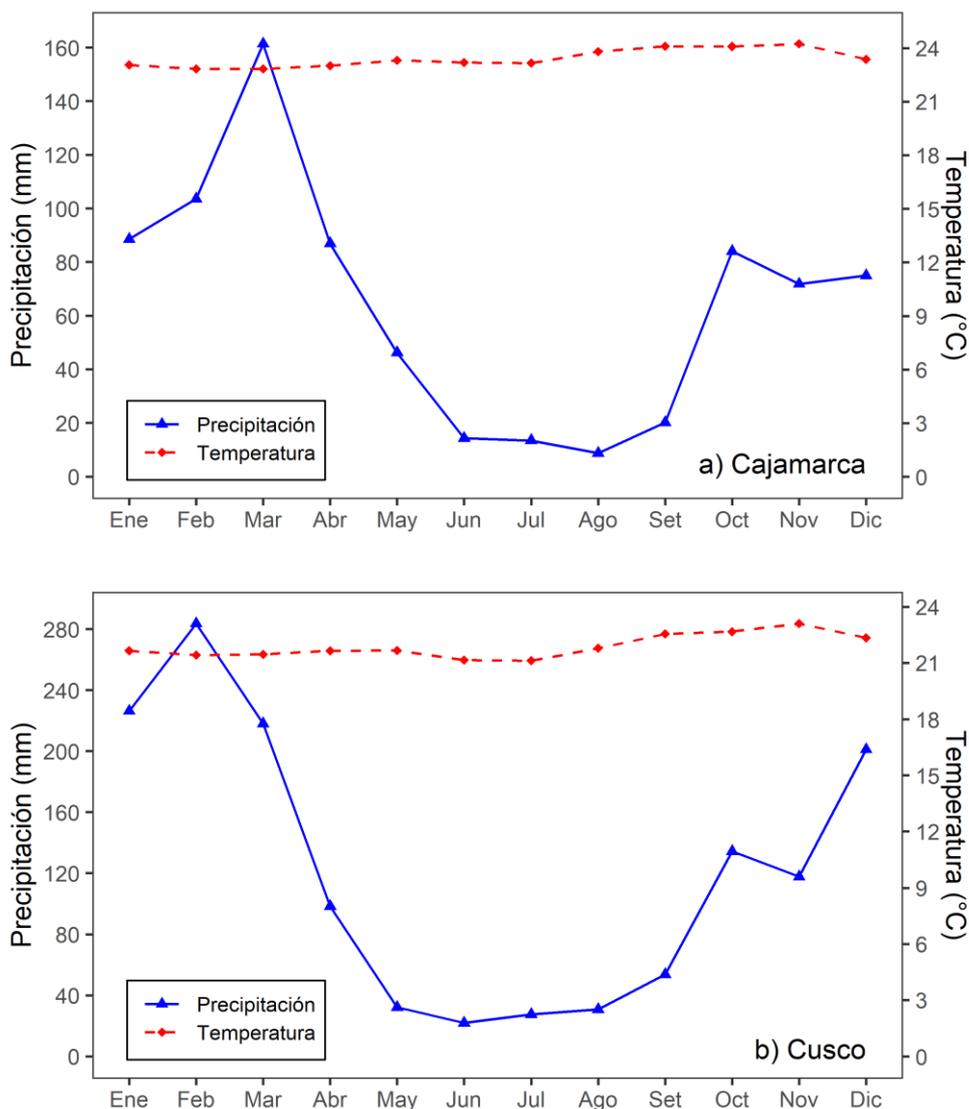


Figura 25: Precipitación y temperatura máxima mensual promedio en Cajamarca (a) y Cusco (b)

4.2 Registro histórico de incendios en Cajamarca y Cusco

Considerando el análisis desde el 01-enero-2002 al 31-diciembre-2016, se observa que en la región Cajamarca (Figura 26a) existió un incremento severo de incendios durante el 2005 (~400%) y el 2016 (~600%); asimismo, en la región Cusco (Figura 26b) la severidad en la frecuencia de eventos se presentó en el 2005 (~300%) y el 2010 (~250%), respecto a los años con ocurrencia promedio.

Los incrementos severos de incendios durante estos años, como lo menciona Zubieta et al. (2019) estarían atribuidas a un retraso de las lluvias durante el inicio de la temporada húmeda o periodos de sequías extremas en la cuenca andina-amazónica que estuvieron asociados a

anomalías positivas de la TSM en Atlántico y en el Pacífico (eventos El Niño) (Espinoza et al., 2011; Marengo et al., 2011; Jimenez et al., 2019).

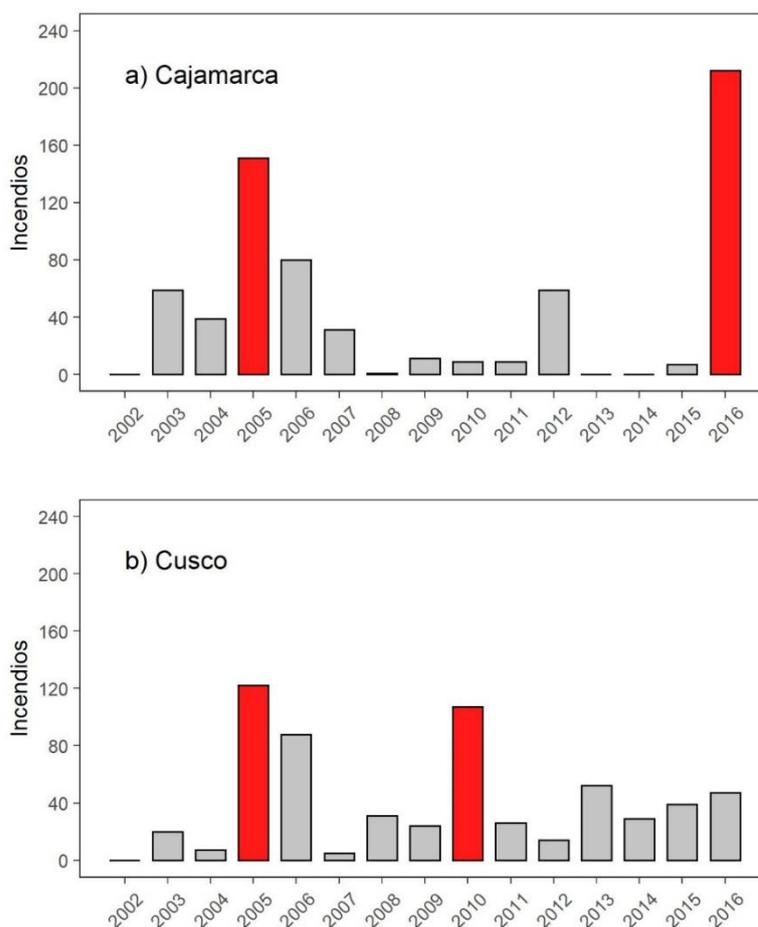


Figura 26: Registro histórico de incendios en Cajamarca (a) y Cusco (b)

4.3 Análisis de la distribución temporal y espacial de los incendios forestales, según el tipo de cobertura vegetal, a lo largo de intervalos altitudinales

Entre el 2002 y el 2016, en el departamento de Cusco y Cajamarca se han producido 718 y 706 incendios forestales respectivamente, representando las dos regiones de la sierra peruana donde estos eventos se dan con mayor recurrencia, causando la pérdida y deterioro de miles de hectáreas de cubierta natural. SERFOR (2018) señala que los incendios del año 2016 provocaron que se pierdan aproximadamente 16 355 Ha en Cusco y 27 561 Ha en Cajamarca de pastos naturales.

Los ecosistemas más afectados en Cajamarca (Figura 27a) fueron los matorrales andinos (195 incendios), jalca (107 incendios) y vegetación secundaria (252 incendios). Por otro lado, en la región Cusco (Figura 27b) fueron los matorrales andinos (121 incendios),

pajonales de puna húmeda (272 incendios) y las zonas con vegetación secundaria (121 incendios), estos últimos hacen referencia a las zonas de pastos naturales que fueron convertidos en áreas de pastos cultivables. Algunos ecosistemas como los pajonales de puna húmeda o las jalcas, que presentan una cobertura arbustiva húmeda, son los más afectados pese a que aparentemente no presentan condiciones de humedad que puedan favorecer el desarrollo del fuego; esto podría estar asociado a que no se encuentran adaptados a este tipo de perturbaciones antrópicas, los cuales alteran su capacidad de recuperación, a diferencia de ecosistemas como los páramos y la puna andina que están adaptadas al fuego, ya que han vivido con ella durante siglos (Myers, 2007).

El análisis de ecosistemas es importante para reconocer sobre qué tipo de vegetación el fuego alcanza una mayor facilidad de ignición, así como el tipo, la gravedad y la frecuencia del fuego (Manta, 2018) en función a las condiciones climáticas de los diferentes ecosistemas, los cuales pueden agravarse debido a sequías extremas, ya que afectan directamente el contenido de humedad en el suelo y la vegetación. Por lo que resulta de gran relevancia estudiar los factores que intervienen en el desarrollo de los incendios forestales sobre ecosistemas como los de alta montaña, ya que estos representan una serie de amenazas sobre los regímenes hidrológicos, el rendimiento hídrico (que representa el 57 % del agua de la relación caudal/precipitación del promedio) y la disponibilidad de agua dulce que se generan en los bosques andinos. (Shilsky et al. 2007; Tobón y Arroyave, 2008; Manta, 2017).

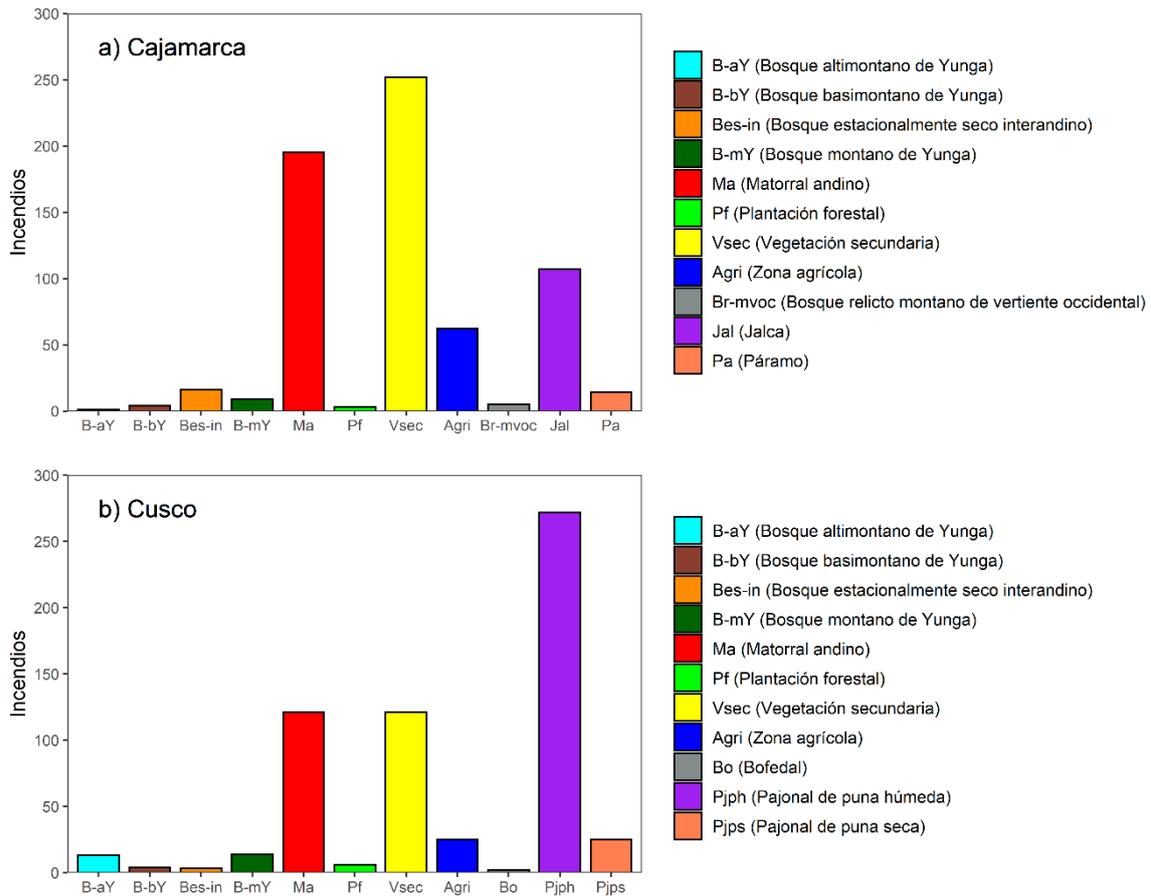


Figura 27: Incendios forestales presentados por ecosistema entre 2002-2016 para Cajamarca (a) y Cusco (b)

Los ecosistemas donde se desarrollaron los incendios fueron agrupados según las características predominantes de la cobertura vegetal existente fueron los pastizales andinos, matorrales andinos y bosques naturales (Figura 28), coherente con lo indicado con Román-Cuesta et al. (2014) y Manta y Kommeter (2018). En Cajamarca los ecosistemas que fueron clasificados como pastizales andinos, debido a que presentan extensas formaciones herbáceas, fueron: jalca, páramo y vegetación secundaria; el ecosistema de matorral andino, debido a que es un tipo de vegetación leñosa y arbustiva, no se agrupó con otro tipo de cobertura; los ecosistemas de bosques naturales fueron las unidades donde predominan las especies arbóreas, las cuales fueron: bosque estacionalmente seco interandino, bosque montano de yunga, basimontano de Yunga, bosque relicto montano de vertiente occidental y bosque altimontano (Pluvial) de Yunga; las unidades con características diferentes como zonas agrícolas y plantaciones forestales se agruparon en la categoría de “otros”. En Cusco, las coberturas de pastizales andinos fueron: pajonales de puna húmeda, pajonal de puna seca

y vegetación secundaria; los matorrales andinos forman una sola unidad; los bosques naturales fueron: bosque de colina alta, bosque altimontano (Pluvial) de Yunga, bosque basimontano de Yunga, bosque montano de Yunga y bosque estacionalmente seco interandino; mientras que los que se agruparon en “otros” fueron las unidades de zona urbana, zona agrícola, plantación forestal y bofedal.

El uso del fuego es considerado el método más económico para transformar suelos forestales y de protección al uso agrícola y pecuario, por lo que representa la causa de más del 90% de incendios forestales en los Andes peruanos, principalmente en altitudes entre los 2000 y 3500 msnm, siendo los ecosistemas más afectados los pastizales andinos, matorrales andinos y bosques naturales (Manta, 2017; SERFOR, 2018).

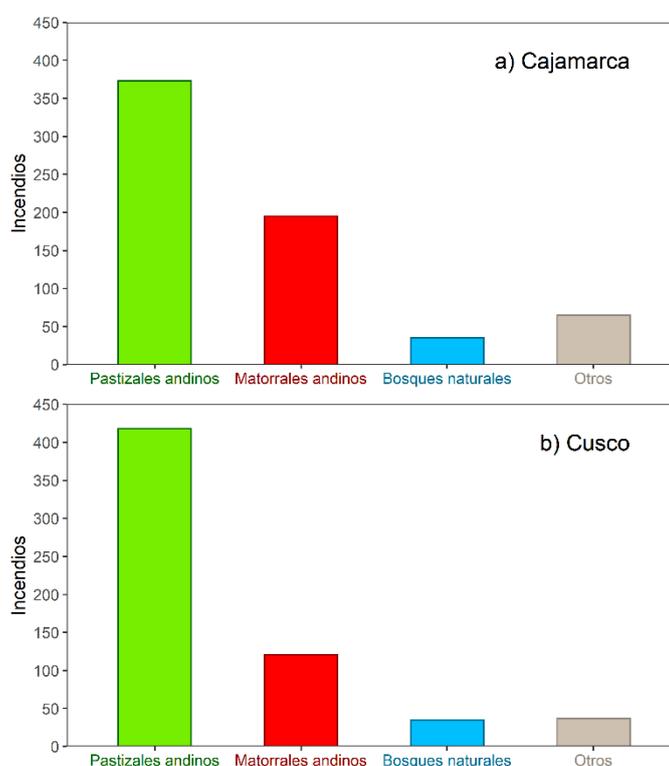


Figura 28: Incendios forestales presentados por tipo de cobertura natural entre 2002-2016 para Cajamarca (a) y Cusco (b)

La Figura 29 muestra la distribución mensual de los incendios forestales a lo largo la de intervalos altitudinales para las regiones priorizadas. En Cajamarca (a) se observa que a partir de agosto se presenta el incremento de los incendios forestales, donde más del 50% se originan en elevaciones por encima de los 3000 msnm, principalmente afectando los pastizales andinos. Luego existe una transición entre octubre y noviembre donde más del

75% de los incendios se desarrollaron en altitudes mayores a los 1500 msnm sobre pastizales andinos, matorrales andinos y bosques naturales, siendo noviembre el mes que presenta la mayor densidad de los eventos registrados. Entre diciembre y febrero los incendios disminuyeron considerablemente, desarrollándose principalmente entre las cotas 750 a 2500 msnm. Asimismo, en Cusco (b) los incendios aumentan de forma gradual desde junio hasta setiembre donde más del 50% de estos eventos se registran en altitudes superiores a los 3500 msnm, afectando principalmente los pastizales andinos; mientras que el otro 50% se distribuye entre los 1000 a 3500 msnm, impactando fundamentalmente a los matorrales andinos y bosques naturales. Entre octubre y noviembre el número de incendios empieza a disminuir, presentando una transición paulatina en el que más del 75% se desarrolló en cotas superiores a los 1500 msnm, afectando en su mayoría a los pastizales y matorrales andinos.

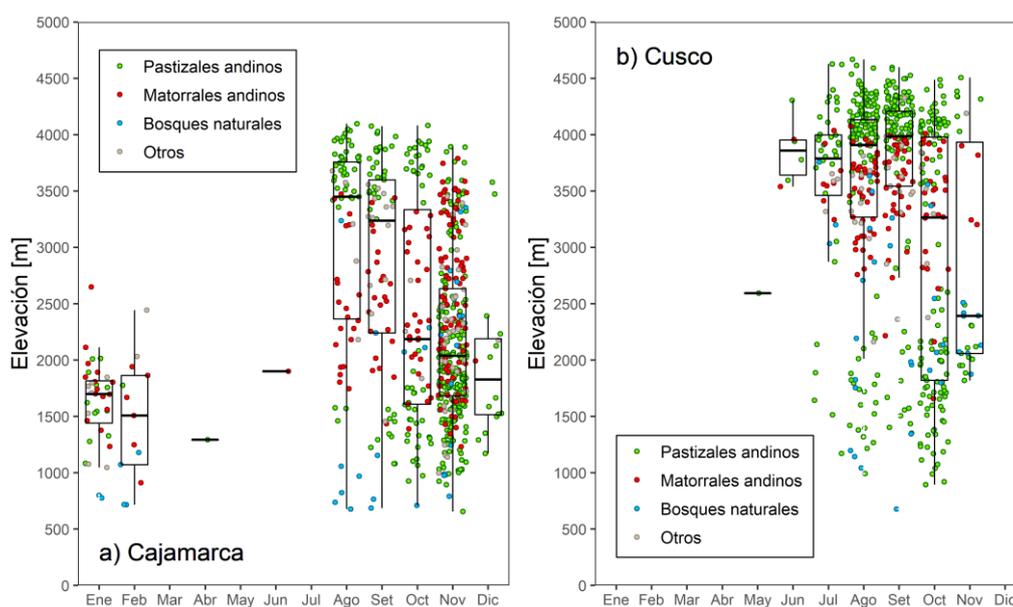


Figura 29: El Diagrama de Cajas de la evolución mensual de los incendios forestales a lo largo de intervalos altitudinales por tipo de vegetación en Cajamarca (a) y Cusco (b)

Partiendo de otros estudios en la región (Zulkafli et al., 2014; Zubieta et al., 2017), se ha considerado la cota 1500 msnm como la divisoria de los Andes peruanos. En la Figura 30a y la Figura 31a se puede observar una gran densidad de incendios forestales sobre la región andina (área amarilla) de Cajamarca y Cusco, respectivamente. Al norte de Cajamarca existe una clara afectación sobre los pastizales, en el centro prevalecen los matorrales, mientras que al sur el impacto fue en ambos ecosistemas. Por otro lado, en Cusco, los pastizales son los ecosistemas más afectados por eventos de incendios forestales, los cuales se encuentran distribuidos homogéneamente sobre toda la región, mientras que los matorrales que fueron

impactados se desarrollaron en la zona central y sur. La escarpada topografía propia de la Cordillera de los Andes podría ser una de las causas del por qué se presenta una gran cantidad de incendios forestales sobre los ecosistemas de estas regiones, debido a que las fuertes pendientes existentes ($>25^\circ$), sumadas a la extensa cobertura vegetal con bajos niveles de humedad durante la temporada de estiaje, aumentan el riesgo de que el fuego se propague con mayor facilidad (UCAR, 2009; Manta 2017; CENEPRED, 2018). Esto podría contribuir a explicar las causas de que se registre una gran densidad de incendios en los ecosistemas altoandinos de Cajamarca y Cusco.

Por otro lado, en la Figura 30b y la Figura 31b se muestra la distribución mensual promedio de los incendios forestales durante años de condiciones normales y años con ocurrencia extrema para Cajamarca y Cusco, respectivamente. En Cajamarca, durante los años donde se registraron mayor número de incendios forestales (2005 y 2016) se observa un incremento por encima de lo normal desde agosto, con una intensificación en noviembre. Asimismo, en Cusco durante los años con aumento severo de incendios forestales (2005 y 2010) se presenta un registro por encima del promedio desde agosto, con un incremento más constante hasta noviembre. Según el calendario agrícola del Ministerio de Agricultura (<https://www.minagri.gob.pe/portal/21-sector-agrario/agricola/>), en Cajamarca las actividades para la campaña de siembra es mayor entre octubre y diciembre, mientras que en Cusco se intensifica entre agosto y octubre. Esto podría responder a la diferencia en el aumento de los incendios forestales existente en estas regiones, pues estas actividades se caracterizan por el uso del fuego en el manejo y extensión de la superficie agrícola (Manta, 2017; SERFOR, 2018)

El desarrollo de incendios durante el segundo semestre podría deberse a los bajos niveles de humedad en el suelo y la vegetación propias de la parte final del periodo seco (agosto-setiembre), condiciones que pueden agravarse ante la presencia de un evento de sequía, ya que pueden manifestarse con retrasos en el inicio de la temporada de lluvias (octubre-noviembre) (Zubieta et al., 2019).

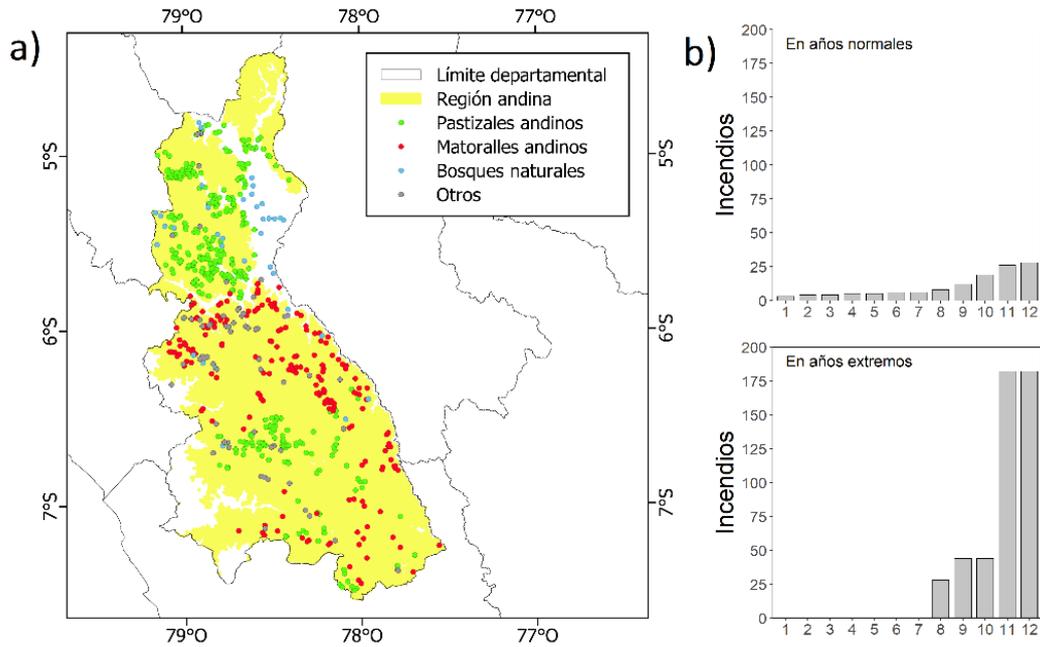


Figura 30: (a) Distribución espacial de incendios sobre la región andina (> 1500 msnm) por ecosistema y (b) comportamiento estacional (meses 1-12) de incendios forestales acumulados totales en años normales y extremos (2005 y 2016) para la región Cajamarca

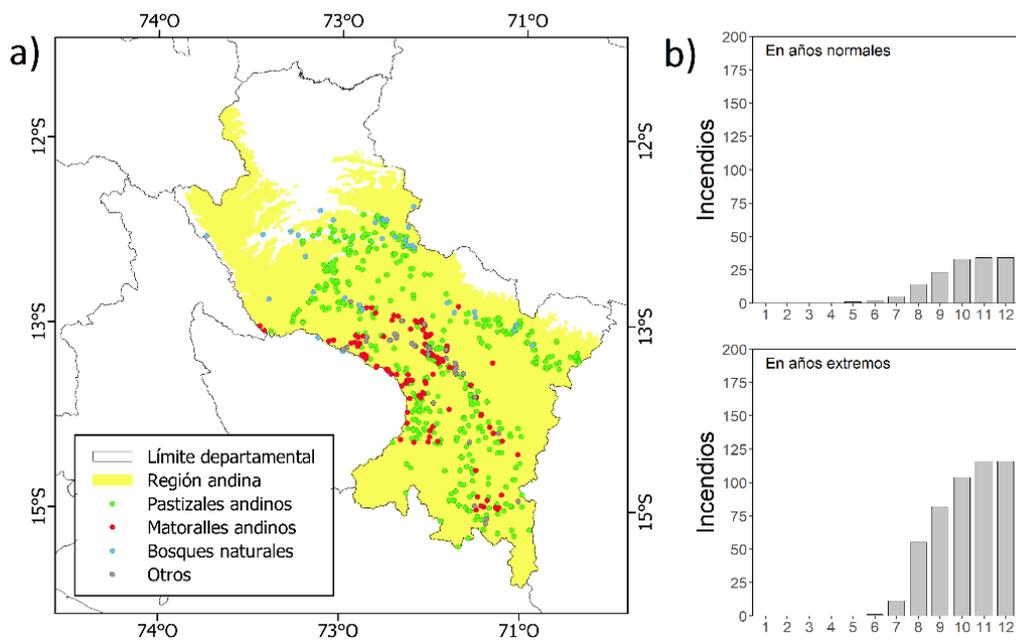


Figura 31: (a) Distribución espacial de incendios sobre la región andina (> 1500 msnm) por ecosistema y (b) comportamiento estacional (meses 1-12) de incendios forestales acumulados totales en años normales y extremos (2005 y 2010) para la región Cusco

4.4 Caracterización espacial de sequías

Un periodo de estiaje que se extiende más de lo normal, o un retraso en la parte inicial de la temporada de lluvias pueden dar paso a que se manifieste una sequía extrema, amplificando considerablemente las condiciones ambientales (vegetativas y climáticas) favorables a eventos como los incendios forestales en las que la población puede ejercer como agente detonante (quemadas agropecuarias) (Nobre et al., 2016; Zubieta et al., 2019).

Con el fin de estimar los déficits de humedad en la región andina de Cajamarca (Figura 32) y Cusco (Figura 33) durante la temporada de estiaje (mayo-setiembre) en los años donde se registraron sequías extremas en la cuenca andino-amazónica (2005, 2010 y 2016), asociadas a anomalías positivas de temperatura superficial del mar (TSM) en el Pacífico y Atlántico (Espinoza et al., 2011; Erfanian et al., 2017; Jimenez et al., 2019), se ha considerado a setiembre como el mes base para el cálculo del SPI3 (caracteriza la precipitación acumulada entre julio y setiembre) y SPI6 (caracteriza la precipitación acumulada entre abril y setiembre). Basados en la clasificación de las condiciones de sequía por el SPI (Tabla 12). En el 2005, el SPI3 muestra que entre julio-setiembre la zona este de Cajamarca fue afectada por una sequía moderada en ~32% de la superficie, mientras en Cusco las sequías afectaron ~34% de la superficie sur, donde ~5% alcanzó un nivel de sequía extrema. Así mismo, el SPI6-2005 señala que condiciones de sequía entre abril-setiembre se manifestaron en ~98% de la superficie en Cajamarca, acentuándose los niveles extremos en la parte central y sur, mientras que en Cusco se presentó en la parte suroriental alrededor del ~50% del área total, en su mayoría a un nivel moderado. En el 2010, en la región Cusco, el SPI3 muestra la ocurrencia de sequías a un nivel de moderada a extrema en ~35% de la superficie al sur del departamento entre julio-setiembre, asimismo el SPI6 indica el desarrollo de sequías moderadas, severas y extremas en ~17%, ~7% y ~4% del territorio, respectivamente, que afectaron principalmente la parte central. En contraste a esto, la región Cajamarca presentó condiciones normales de precipitación en casi la totalidad del territorio durante este periodo del año 2010. Para el 2016, el SPI6 indica que las sequías se desarrollaron principalmente en Cajamarca, siendo los meses entre abril y julio el periodo que se caracterizó por presentar un déficit de lluvias alrededor del ~33% de la superficie al sur del departamento, categorizado entre sequía moderada y sequía extrema. En la región Cusco, el SPI6 muestran condiciones normales durante el 2016 en más del 95% de su superficie.

Lo documentado en diferentes estudios indican que en el 2005 la sequía extrema en la cuenca andino-amazónica se presentó con anomalías negativas de lluvia en regiones que cubrieron gran parte de los Andes peruanos entre junio-agosto (Erfanian et al. 2017). En el 2010 estas anomalías afectaron principalmente el centro y sur de la región Andina durante el tercer trimestre (Erfanian et al., 2017). En el 2005 y 2010 también se registraron déficits del flujo húmedo de hasta el 56% y 29%, respectivamente, comparado a las condiciones normales entre 1970 y 2009 (Espinoza et al., 2011). En el 2016, en los Andes peruanos, las anomalías negativas se observan fundamentalmente en la Sierra norte, incluso desde el inicio de la temporada seca (Erfanian et al., 2017). Las sequías del 2005 y 2010 coincidieron con el aumento de la TSM en la región del Atlántico Norte, mientras que el 2016 se caracterizó por un aumento notable de la TSM en la región del Pacífico Central.

En resumen, las sequías del 2005 y 2016 tuvieron mayor impacto durante la temporada de estiaje en los Andes de Cajamarca, lo que coincidió principalmente con el desarrollo de anomalías positivas en la TSM en el Pacífico Central durante el primer semestre del año (Jimenez et al. 2019) y un incremento severo de incendios forestales; asimismo, las sequías del 2005 y 2010 tuvieron un alcance importante sobre los Andes de Cusco en el periodo seco, coincidiendo con el incremento de la temperatura del Atlántico Norte (Espinoza et al., 2011) y un aumento de incendios forestales por encima del promedio. Los bajos niveles de lluvia, propias de las condiciones de sequías, sumado al mal manejo en el uso del fuego por parte de la población, crearían las condiciones potenciales para el incremento de la frecuencia de los incendios forestales sobre la cobertura natural en relación a años con precipitación promedio.

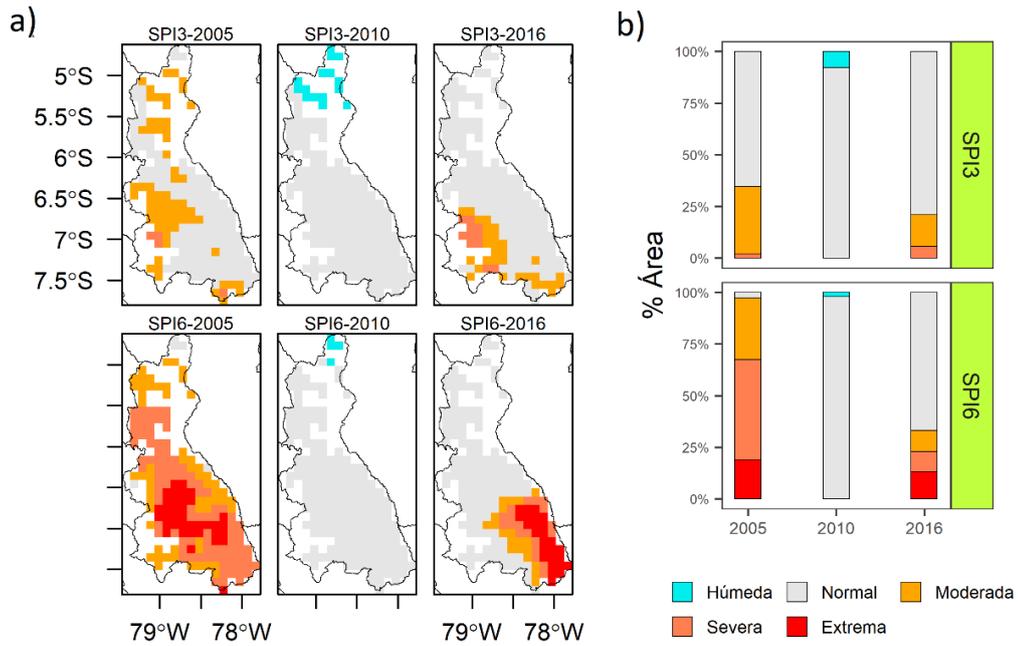


Figura 32: Caracterización espacial de sequías (a) y porcentaje de área afectada por las sequías (b) con base en el SPI3 (julio-setiembre) y SPI6 (abril-setiembre) en la región andina de Cajamarca durante los años de eventos extremos en la cuenca amazónica (2005, 2010 y 2016)

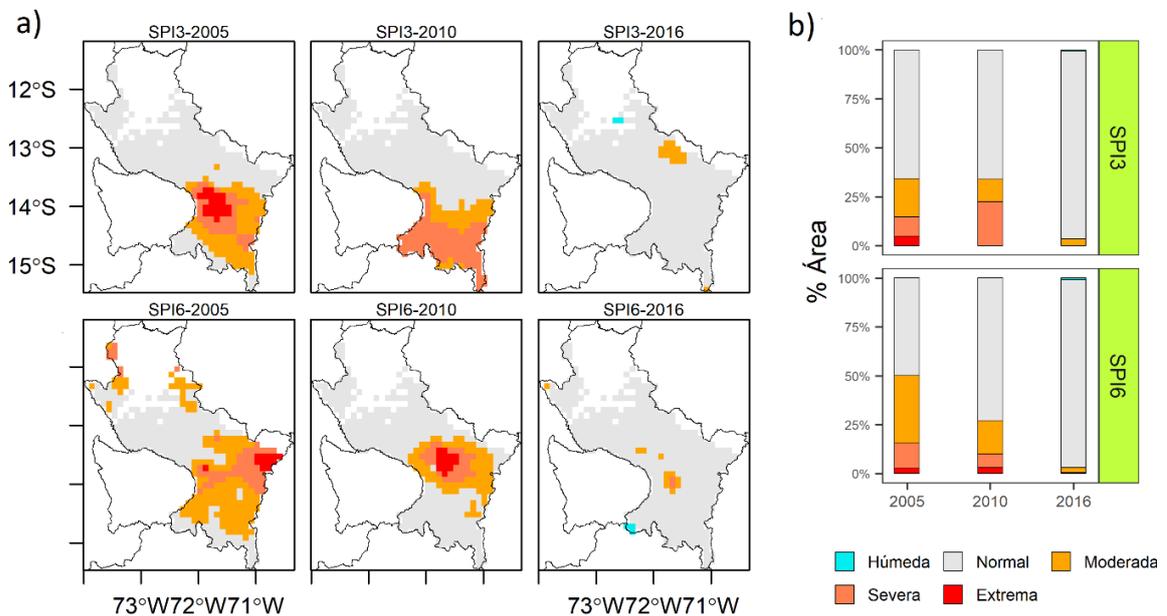


Figura 33: Caracterización espacial de sequías (a) y porcentaje de área afectada por las sequías (b) con base en el SPI3 (julio-setiembre) y SPI6 (abril-setiembre) en la región andina de Cusco durante los años de eventos extremos en la cuenca amazónica (2005, 2010 y 2016)

4.5 Análisis de tendencia interanual de la vegetación

Se analizó la tendencia de la evolución interanual de la vegetación a partir de los valores medios mensuales, para el periodo 2002-2016, de diferentes índices espectrales con base en la prueba de Mann-Kendall. Según el nivel de significancia para la prueba ($\alpha = 0.05$; $Z=1.96$), los estadísticos resultantes (Z_s) de los índices se muestran en la Tabla 13. En la región Cajamarca se observa que el EVI, GEMI, GVMI, NDII, NDVI, NDWI y SAVI tienen una tendencia creciente no significativa ($Z_s < +1.96$), mientras que el VARI sigue una tendencia decreciente no significativa ($Z_s > -1.96$). Por otro lado, en la región Cusco la tendencia de los índices EVI, GEMI y el SAVI son positivas y no significativas, mientras que el GVMI, NDII, NDVI, NDWI y VARI siguen una tendencia decreciente no significativa. Sequías extremas en la cuenca andino-amazónica, asociadas a la variabilidad natural del clima, se han venido presentando con mayor frecuencia en los últimos años (Espinoza et al., 2011; Espinoza et al., 2016). Uno de los impactos que generan estos eventos es el de incrementar la mortalidad de los bosques debido a la intensificación de los incendios en los últimos años (Brienen et al., 2015; Nobre et al., 2016).

Los resultados de tendencia mostrados indicarían que en Cajamarca existe una ganancia de las condiciones vegetativas al presentar una tendencia positiva en la mayoría de los índices evaluados; mientras que en Cusco esta ganancia/pérdida no es tan clara, aunque en la mayoría de los casos muestran una tendencia positiva. Estos resultados son coherentes con el trabajo realizado por Aide et al. (2019), quien estudió la dinámica de la vegetación en los Andes tropicales y subtropicales entre el 2001 y 2014, donde se observa que en la Sierra norte del Perú existe una clara tendencia a un mayor desarrollo de vegetación, mientras que en la Sierra sur existe un contraste entre el aumento y disminución (mayor o menor desarrollo de vegetación respectivamente) de la cobertura vegetal. Esto puede estar asociado a la variabilidad climática de la región sur en relación al norte, debido a que la influencia que tiene la cordillera de los Andes sobre la circulación atmosférica ejerce impactos diferentes sobre los patrones climáticos en regiones altoandinas geográficamente opuestas (Marengo, 2004; Garreaud, 2009; Espinoza et al., 2009) como lo son Cajamarca y Cusco. Finalmente, en función a estos resultados, se procedió a realizar el análisis de las condiciones vegetativas de los ecosistemas altoandinos en Cajamarca y Cusco con el índice espectral NDVI, al ser un índice que refleja las tendencias expuestas anteriormente, además de ser ampliamente utilizado en el monitoreo de ecosistemas de montaña, tipos de cobertura y bosques (Tote et al., 2011; Soto-Mardones y Maldonado-Ibarra, 2015; Bastidas et al., 2016)

Tabla 13: Resultados de la prueba de Mann-Kendall aplicado para detección de tendencia de índices espectrales en el periodo 2002-2016 en la región Cajamarca y Cusco

Región	Índice	Zs	Z ($\alpha = 0.05$)	Significancia
Cajamarca	EVI	0.8623	+1.96	Tendencia no significativa creciente
	GEMI	0.9761	+1.96	Tendencia no significativa creciente
	GVMÍ	0.5233	+1.96	Tendencia no significativa creciente
	NDII	0.6173	+1.96	Tendencia no significativa creciente
	NDVI	0.7510	+1.96	Tendencia no significativa creciente
	NDWI	0.4540	+1.96	Tendencia no significativa creciente
	SAVI	0.8574	+1.96	Tendencia no significativa creciente
	VARI	-0.7757	-1.96	Tendencia no significativa decreciente
Cusco	EVI	0.0433	+1.96	Tendencia no significativa creciente
	GEMI	0.1769	+1.96	Tendencia no significativa creciente
	GVMÍ	-0.6594	-1.96	Tendencia no significativa decreciente
	NDII	-0.5382	-1.96	Tendencia no significativa decreciente
	NDVI	-0.2759	-1.96	Tendencia no significativa decreciente
	NDWI	-0.4268	-1.96	Tendencia no significativa decreciente
	SAVI	0.0260	+1.96	Tendencia no significativa creciente
	VARI	-1.3003	-1.96	Tendencia no significativa decreciente

4.6 Análisis espacial de anomalías estandarizadas de NDVI durante años de sequía extrema

Las anomalías estandarizadas de NDVI en la región andina de Cajamarca y Cusco fueron estimadas para los meses julio-setiembre, los cuales corresponden a la segunda mitad del periodo de estiaje, de los años 2005, 2010 y 2016. Esto debido a que una temporada seca que se desarrolla con niveles de humedad por debajo de lo normal puede generar perturbaciones drásticas sobre la cobertura vegetal (Tiedeaman et al., 2010; Durante, 2016), lo que hace más susceptible a los ecosistemas naturales a sufrir graves daños debido a eventos como los incendios forestales, los cuales se presentan con mayor frecuencia ante ambientes de sequías (Manta, 2017; Zubieta et al., 2019).

La categorización de las anomalías estandarizadas de NDVI se muestra en la Tabla 11. En la Figura 34 se puede observar que, en los Andes de Cajamarca, durante el 2005 las

anomalías que indican un déficit en las condiciones vegetativas se presentaron en más del 70% de la región, de los cuales las categorizadas con déficit moderado y extremo representaron el rededor del 30% de la zona estudiada. En el 2010 cerca del 75% del área presentó condiciones normales y el 10% con condiciones de vegetación por encima del promedio. Durante el 2016 se registraron anomalías que indican una perturbación importante en aproximadamente el 25% de la cobertura vegetal total de la región.

Por otro lado, la Figura 35 muestra las anomalías registradas en los Andes de Cusco. Se observa que en el 2005 las anomalías que indican algún déficit de las condiciones normales de vegetación se encuentran aproximadamente en 50% de la zona de estudio, predominando el déficit ligero en un área mayor al 30% de la región. En el 2010, las perturbaciones estuvieron en alrededor del 37% de toda la cobertura vegetal, siendo las categorizadas con déficit ligero las que ocuparon una superficie cercana al 30%. Durante el 2016 cerca del 70% de la vegetación de la región presentó condiciones normales, acompañados con un superávit de las condiciones vegetativas en del 10% del área en estudio.

Estos resultados coinciden con el estudio de Erfanian et al. (2017), quién presenta anomalías de NDVI a nivel trimestral durante el 2005, 2010 y 2016 para toda Sudamérica, con el fin de investigar los impactos sobre la vegetación que tuvieron las sequías relacionadas al aumento de la TSM en el Pacífico y el Atlántico Tropical. Asimismo, el incremento severo de incendios forestales que se presentó durante el 2005 y 2016 en Cajamarca, y 2005 y 2010 en Cusco, registrado por la Dirección General y Ordenamiento Territorial (DGOTA) del Ministerio del Ambiente (MINAM), coincide con las sequías desarrolladas durante estos años, las cuales fueron catalogadas como los eventos históricos más devastadores en la última década sobre la cuenca Amazónica (Marengo et al., 2008; Brando et al., 2014; Erfanian et al., 2017). De esta manera se evidenciaría la relación existente entre las condiciones vegetativas por debajo de lo normal que se presentan debido a déficits de humedad propias de las sequías con el aumento en la ocurrencia de incendios forestales en los Andes peruanos.

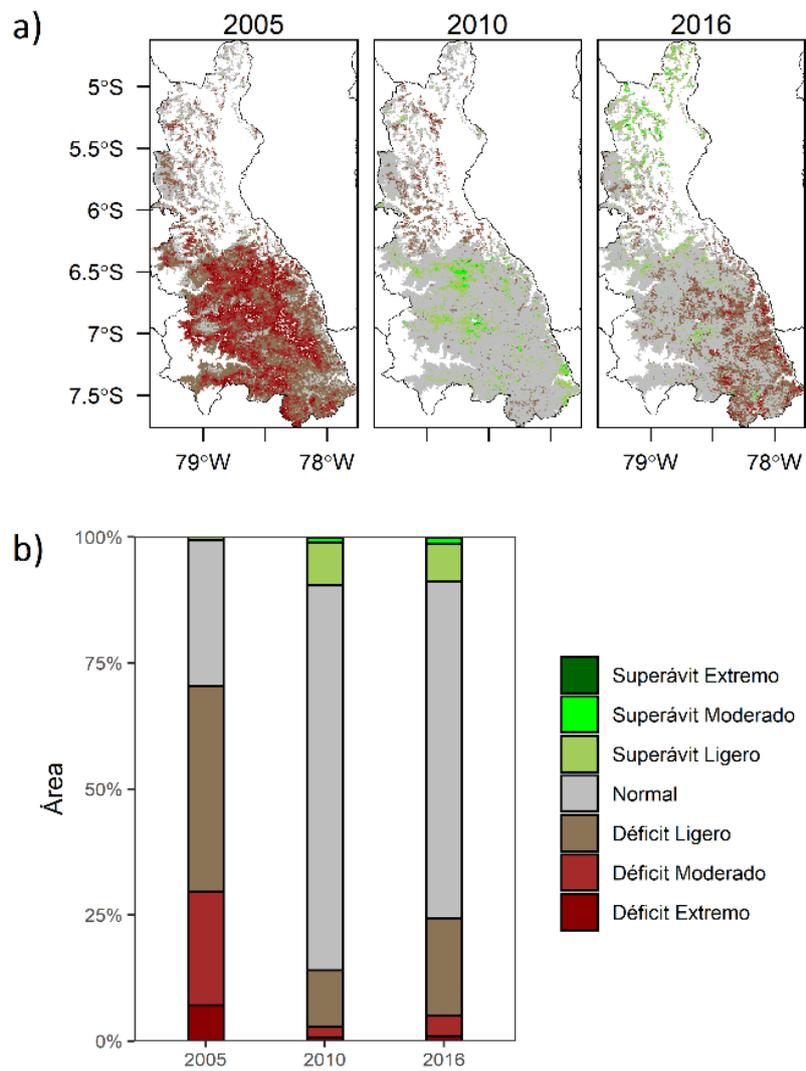


Figura 34: Distribución espacial de anomalías estandarizadas de NDVI (a) y porcentaje de área afectada por estas (b) en la región andina de Cajamarca durante los años de sequía en la cuenca Amazónica 2005, 2010 y 2016

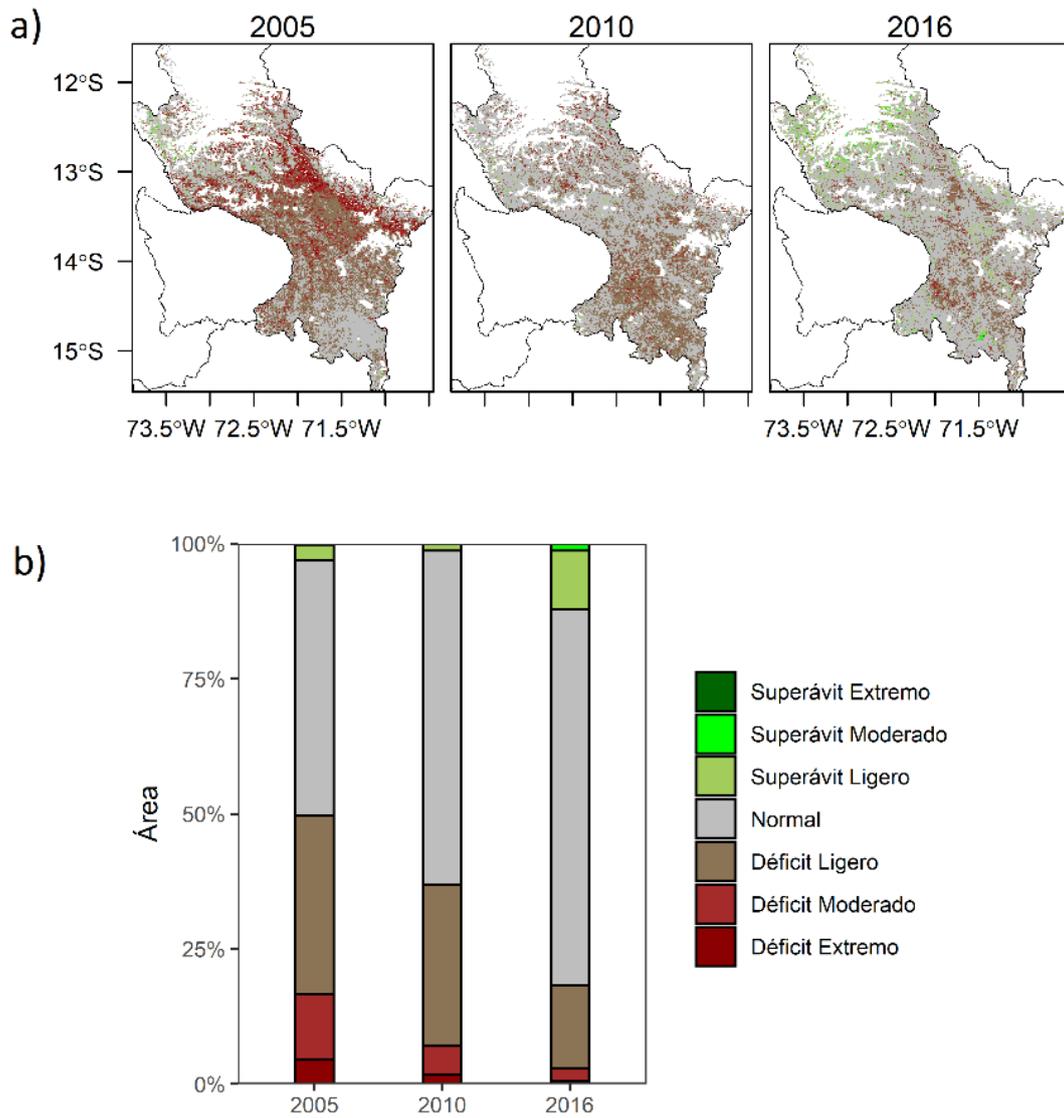


Figura 35: Distribución espacial de anomalías estandarizadas de NDVI (a) y porcentaje de área afectada por estas (b) en la región andina de Cusco durante los años de sequía en la cuenca Amazónica 2005, 2010 y 2016

4.7 Relación entre las anomalías estandarizadas de NDVI y la ocurrencia de incendios forestales durante los años de sequía

Con la finalidad de establecer una asociación entre el incremento de incendios forestales y las condiciones vegetativas en la parte final de la temporada de estiaje durante los años de sequía extrema, se cuantificaron las anomalías estandarizadas de NDVI desarrollados entre los meses julio-setiembre para cada incendio forestal sobre los ecosistemas naturales.

La Tabla 14, correspondiente a Cajamarca, indica que en el 2005 se registraron 81 eventos sobre los pastizales andinos y 35 sobre los matorrales andinos, de los cuales el 90.12% y 88.57% de estos, respectivamente, se desarrollaron sobre vegetación que presentó anomalías negativas de NDVI durante los últimos meses de la temporada seca. En el 2016, se identificaron 95 incendios forestales sobre pastizales andinos y 67 sobre los matorrales andinos, representando el 36.84% y 53.73%, respectivamente, los eventos identificados sobre cobertura que presentó anomalías negativas. Por otro lado, en la Tabla 15, correspondiente a Cusco, se observa que durante el 2005 se registraron 91 incendios forestales sobre los pastizales andinos y 14 sobre los matorrales andinos, de estos eventos, el 95.60% y 100.00%, respectivamente, se originaron sobre vegetación que evidenció déficits de sus condiciones normales. Asimismo, en el 2010 se identificaron 86 eventos desarrollados sobre pastizales andinos y 14 sobre matorrales andinos, de los cuales el 91.86% y 92.86% de los eventos se encontraron sobre la vegetación que se presentó con anomalías negativas del índice espectral NDVI.

Estos resultados indicarían la relación de causalidad existente entre las condiciones vegetativas por debajo de lo normal y el incremento severo de incendios forestales que se registraron durante los años de sequía extrema, debido a que una reducción de la precipitación inferior al promedio en la parte final del periodo de estiaje e inicial de la época de lluvias causa niveles de sequedad extrema en la vegetación, convirtiéndolo en el material combustible ideal para que el fuego pueda desencadenarse con facilidad (Manta, 2017; SENAMHI, 2018; Zubieta et al., 2019).

Tabla 14: Relación entre las anomalías estandarizadas de NDVI y la ocurrencia de incendios forestales en ecosistemas durante años de sequía en Cajamarca

Incendios forestales totales	% Incendios forestales desarrollados en zonas con anomalías negativas de NDVI	Año	Ecosistema
81	90.12	2005	Pastizales andinos
35	88.57	2005	Matorrales andinos
11	90.91	2005	Bosques naturales
95	36.84	2016	Pastizales andinos
67	53.73	2016	Matorrales andinos
7	42.86	2016	Bosques naturales

Tabla 15: Relación entre las anomalías estandarizadas de NDVI y la ocurrencia de incendios forestales en ecosistemas durante años de sequía en Cusco

Incendios forestales totales	% Incendios forestales desarrollados en zonas con anomalías negativas de NDVI	Año	Ecosistema
91	95.60	2005	Pastizales andinos
			Matorrales andinos
14	100.00	2005	
16	75.00	2005	Bosques naturales
86	91.86	2010	Pastizales andinos
			Matorrales andinos
14	92.86	2010	
6	100.00	2010	Bosques naturales

4.8 Análisis de las condiciones vegetativas mensuales durante años de sequía extrema

Se ha realizado el análisis del comportamiento de las condiciones vegetativas por tipo de cobertura a partir de los valores promedio por mes del índice espectral NDVI (Figura 36), resaltando los años de sequía extrema 2005, 2010 y 2016, los cuales tuvieron impactos hidrológicos y climáticos en los Andes y la Amazonía (Espinoza et al., 2011; Erfanian et al., 2017; Jimenez et al., 2019). Durante el 2005, los pastizales andinos, matorrales andinos y bosques naturales en Cajamarca se presentaron condiciones secas por debajo del

primer cuartil en el periodo de estiaje, principalmente en setiembre, que representó el mes con las condiciones más bajas entre 2002-2016. En el 2016 se observa un comportamiento por debajo del promedio solo en la primera parte de la temporada de estiaje (mayo-julio), luego la vegetación (pastizales andinos, matorrales andinos y bosques naturales) se recupera entre setiembre-octubre hasta llegar a noviembre-diciembre, donde las condiciones vegetativas alcanzadas fueron las peores registradas en el periodo analizado. Cabe resaltar que en el 2010 los valores de NDVI por debajo de lo normal de los pastizales andinos, matorrales andinos y bosques naturales se presentaron en la parte inicial de la temporada de lluvias (octubre-diciembre). Por otro lado, en Cusco, los pastizales andinos y matorrales andinos alcanzaron condiciones vegetativas por debajo del promedio durante casi todo el año, en especial en la parte final de la época seca (julio-setiembre) que fueron los mínimos históricos del periodo evaluado. En el 2010 se observa, principalmente en los pastizales andinos, una tendencia a mantener las condiciones vegetativas por debajo del promedio, aunque no tan marcada como en el 2005, desde la parte final de la temporada de lluvias (abril). Esto es coherente con el análisis mostrado por Gutierrez (2018) donde se describe los impactos severos que ejercieron los eventos extremos del 2005 y 2010 sobre la vegetación en la cuenca andina-amazónica durante el periodo de estiaje y la parte inicial de la temporada de lluvias, además de coincidir con las anomalías espaciales de precipitación por trimestre durante el 2005, 2010 y 2016 sobre la región andina que presenta Erfanian et al. (2017).

Estos resultados indicarían que las condiciones de déficit de humedad existente en el suelo debido a los bajos niveles de precipitación o al retraso en el inicio de la temporada de lluvias propias de un evento de sequía (Ronchaill, 1995; Lagos et al., 2005; Giráldez et al., 2020), tuvieron impactos sobre la vegetación, formando de esta manera las condiciones vegetativas (combustible forestal) adecuadas para que el fuego generado durante las actividades de quemas agropecuarias (USAID, 2015; SERFOR, 2018) se desencadenaran con mayor facilidad, resultando así que se incrementa severamente la tasa de incendios forestales, tal y como se registró durante el 2005 y 2016 en Cajamarca, y el 2005 y 2010 en Cusco.

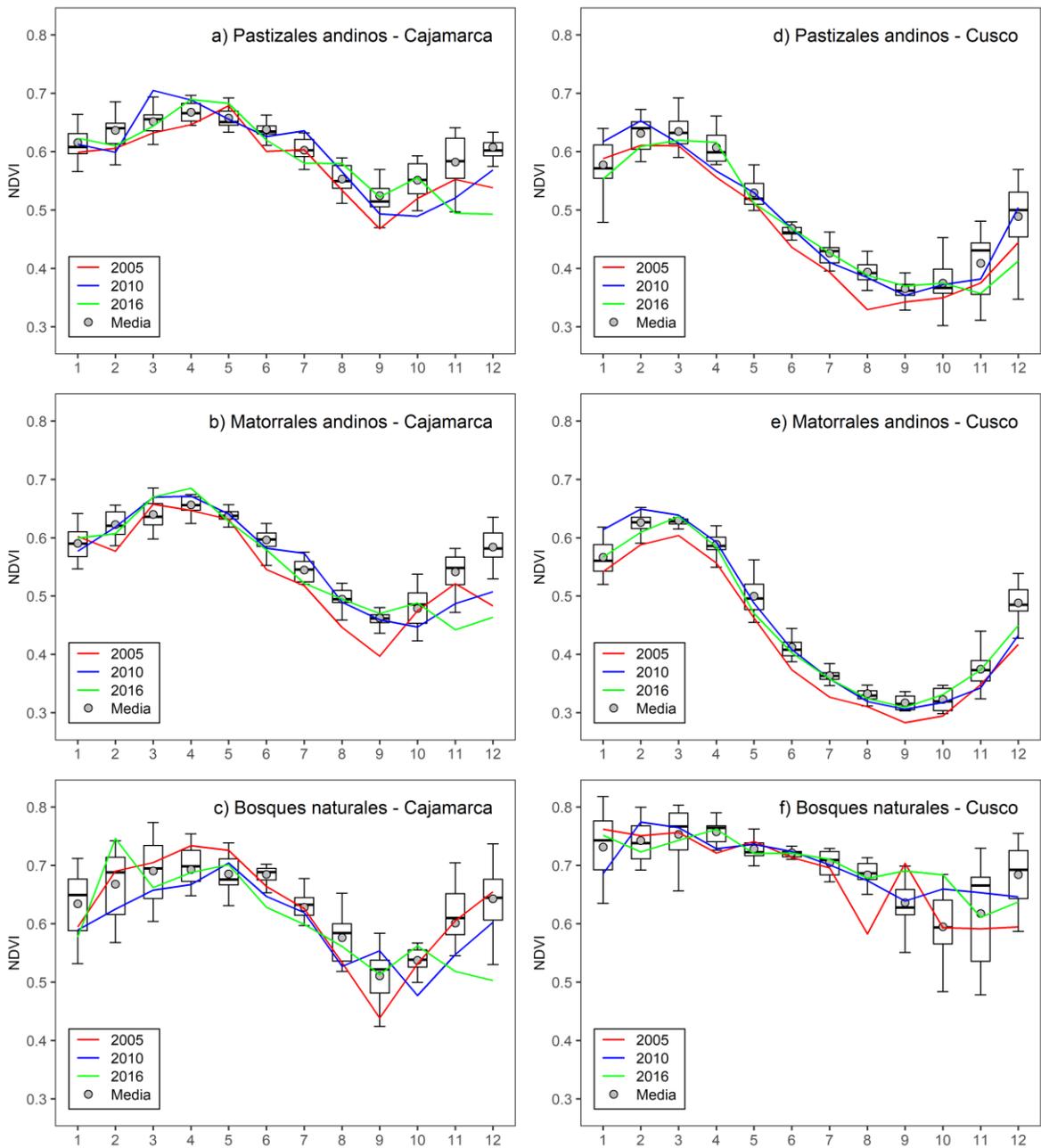


Figura 36: Valores mensuales promedio del índice espectral NDVI para pastizales andinos, matorrales andinos y bosques naturales en Cajamarca (a,b y c, respectivamente) y Cusco (d,e y f, respectivamente) en los años de sequía extrema (2005, 2010 y 2016)

4.9 Análisis de la respuesta de la vegetación a condiciones de sequía

Considerando que la respuesta de la vegetación a cambios de humedad en el suelo es altamente variable y puede manifestarse entre uno o varios meses, en función a las condiciones regionales del clima, tipos de cobertura y las fases de crecimiento (García-Haro et al., 2014; Duval et al., 2015), se ha realizado un análisis de correlación de Pearson entre el índice espectral NDVI con el SPI3, SPI6 y SPI9, con desfase de 1 mes, para los pastizales andinos, matorrales andinos y bosques naturales.

El estado vegetativo de los pastizales andinos en Cajamarca (Figura 37a) muestra una correlación positiva moderada ($r=0.44$; $p<0.05$) con el SPI3 y una correlación positiva fuerte ($r=0.59$; $p<0.05$) con el SPI6 y ($r=0.63$; $p<0.05$) con el SPI9 durante el mes de mayo, lo que indicaría que la actividad fotosintética de este tipo de cobertura sufre mayores impactos a medida en que el déficit de humedad es más prolongado. Asimismo, se observa que en el inicio de la temporada de lluvias (octubre-noviembre) el NDVI alcanzó correlaciones positivas fuertes ($r>0.6$; $p<0.05$) con el SPI3 y SPI6, lo que señalaría que la recuperación de las condiciones vegetativas durante estos meses dependería de los niveles de precipitación alcanzados durante la temporada de estiaje. Por otro lado, en los pastizales andinos de Cusco (Figura 37d) se muestra una correlación positiva fuerte ($r>0.5$; $p<0.05$) con el SPI3. Esto manifestaría que los pastizales andinos en esta región son más susceptibles a los niveles de humedad acumulados en periodos más cortos, por lo que niveles de precipitación por debajo de lo normal, con una marcada estacionalidad durante la temporada de estiaje, significaría que la vegetación presentaría condiciones críticas.

En los matorrales andinos en Cajamarca (Figura 37b) se observa que el NDVI y el SPI3 alcanzan correlaciones positivas fuertes ($r>0.5$; $p<0.05$) entre mayo-enero, por lo que se podría considerar que la persistencia de la actividad fotosintética de una vegetación sana depende fundamentalmente de que no se presenten anomalías de precipitación en el corto plazo (3 meses) durante la temporada de estiaje e inicial de la temporada de lluvias. Por otro lado, en los matorrales andinos de Cusco (Figura 37e) el NDVI alcanza correlaciones positivas fuertes con el SPI3 ($r>0.5$; $p<0.05$) durante casi todo el año (febrero-diciembre). Si bien esto indicaría que este tipo de vegetación es susceptible a las condiciones de humedad por debajo de lo normal en periodos más reducidos, se observa también que el índice espectral alcanza correlaciones positivas fuertes con el SPI6 y SPI9 ($r>0.5$; $p<0.05$) con una estacionalidad parecida, por lo que se podría inferir que los impactos de las sequías, en

cualquier escala de tiempo (3, 6 o 9 meses), tendría implicancia sobre el estado de la vegetación arbustiva de los matorrales andinos en esta región.

Las condiciones vegetativas de los bosques naturales existentes en Cajamarca (Figura 37c) alcanzan, principalmente, una correlación positiva fuerte ($r > 0.5$; $p < 0.05$) con el SPI3 y SPI6 entre octubre-diciembre (inicio de la temporada de lluvias). Esto indicaría que una caída de la actividad fotosintética puede manifestarse ante condiciones de humedad por debajo de lo normal durante la época de estiaje o un retraso de la temporada húmeda. Asimismo, en los bosques naturales andinos de Cusco (Figura 37f) se muestra una correlación positiva moderada ($r = 0.47$, $p < 0.05$) con el SPI6 y una correlación positiva fuerte ($r = 0.75$; $p < 0.05$) con el SPI3 y ($r = 0.57$; $p < 0.05$) con el SPI9 durante el mes de julio, lo que manifestaría que niveles de lluvia inferiores al promedio durante la época de lluvias y, principalmente, en el inicio de la temporada de estiaje, tendría mayores impactos sobre el estado vegetativo de los bosques que se presentan en este mes.

Los resultados mostrados, fundamentalmente sobre los pastizales andinos y matorrales andinos de Cajamarca y Cusco, evidenciarían una relación de causalidad entre las bajas condiciones vegetativas debido a episodios de déficits de humedad durante la época de estiaje e inicial de la temporada de lluvias. Esto podría responder a las tasas extremas de incendios forestales que se registraron en la segunda mitad del año sobre los pastizales andinos y matorrales andinos durante los años donde se registraron sequías extremas en la cuenca andino-amazónica (2005, 2010 y 2016), ya que existe una asociación entre las condiciones críticas de la cobertura (suelo y vegetación muerta) y las actividades antrópicas como fuentes de ignición que facilitan la propagación del fuego (Laurance et al., 1998; Aragão et al., 2008).

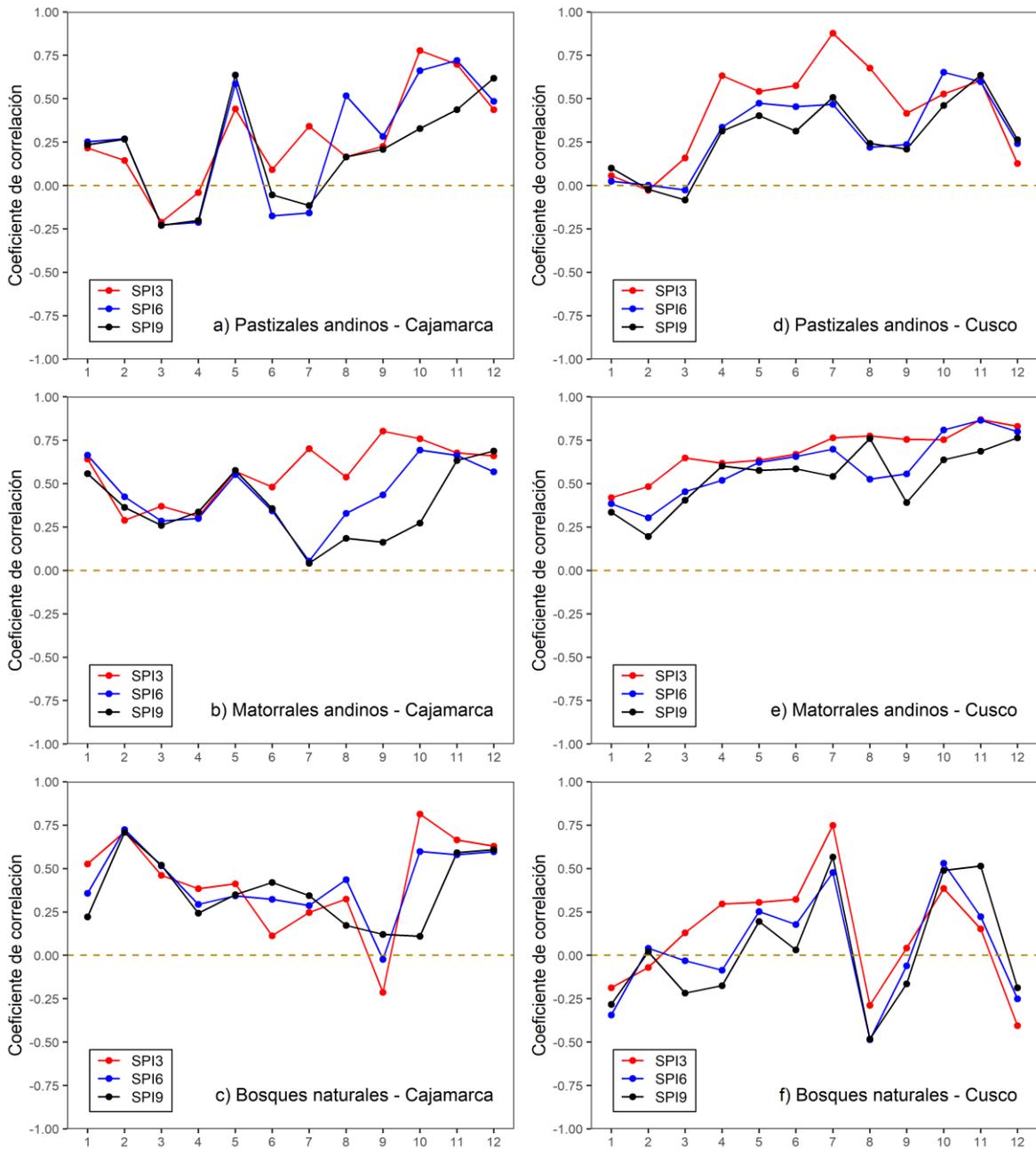


Figura 37: Correlaciones entre el NDVI y el SPI3, SPI6 y SPI9 (con desfase de un mes) para pastizales andinos, matorrales andinos y bosques naturales en Cajamarca (a, b y c, respectivamente) y Cusco (d, e y f, respectivamente)

4.10 Análisis mensual de las variables climáticas por intervalos de altitud

Se ha analizado el comportamiento de la precipitación y temperatura respecto a intervalos de elevación, debido a que la influencia que tiene la cordillera de los Andes sobre la circulación atmosférica podría ejercer impactos diferentes sobre los patrones climáticos en regiones altoandinas geográficamente opuestas (Marengo, 2004; Garreaud, 2009; Espinoza et al., 2009) como lo son Cajamarca y Cusco. En la Figura 38a y Figura 38b se observa una clara estacionalidad de la lluvia en altitudes por encima de los 1500 msnm en Cajamarca y Cusco, respectivamente. Se observa también que en Cajamarca la precipitación no varía a medida que cambian los intervalos de altitud, por lo que su relación no es clara. Esto es congruente con lo descrito en investigaciones previas realizadas por Espinoza et al., 2009 y Krois et al., 2013. Asimismo, en Cusco se evidencia una fuerte relación entre la elevación y la precipitación, el cual se maximiza alrededor de los 1500 msnm y disminuye progresivamente hasta los 5000 msnm. Este efecto es relacionado principalmente al flujo horizontal de humedad que circula sobre esta parte de la cuenca Andino-Amazónica, el cual ha sido ampliamente estudiado (Garreaud, 2009; Espinoza et al., 2009; Chavez y Takahashi, 2017). Por otro lado, las Figuras 39a y Figura 39b muestran el ciclo anual de la temperatura máxima en Cajamarca y Cusco, respectivamente. En general, en ambas regiones se observa que la temperatura disminuye progresivamente a medida que aumenta la altitud desde los 1500 msnm, alcanzando su máximo valor en el mes de noviembre. Esto es coherente con lo descrito por SENAMHI (2016) y Gutierrez (2018).

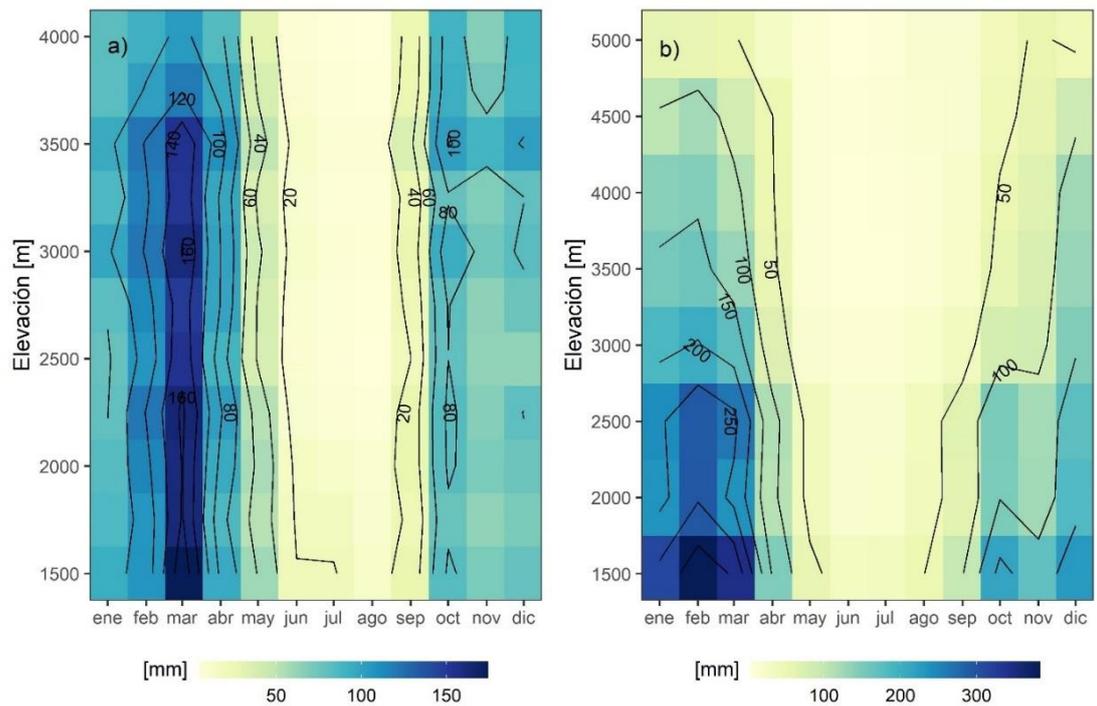


Figura 38: Estacionalidad por altitud de la precipitación en las regiones de a) Cajamarca y b) Cusco

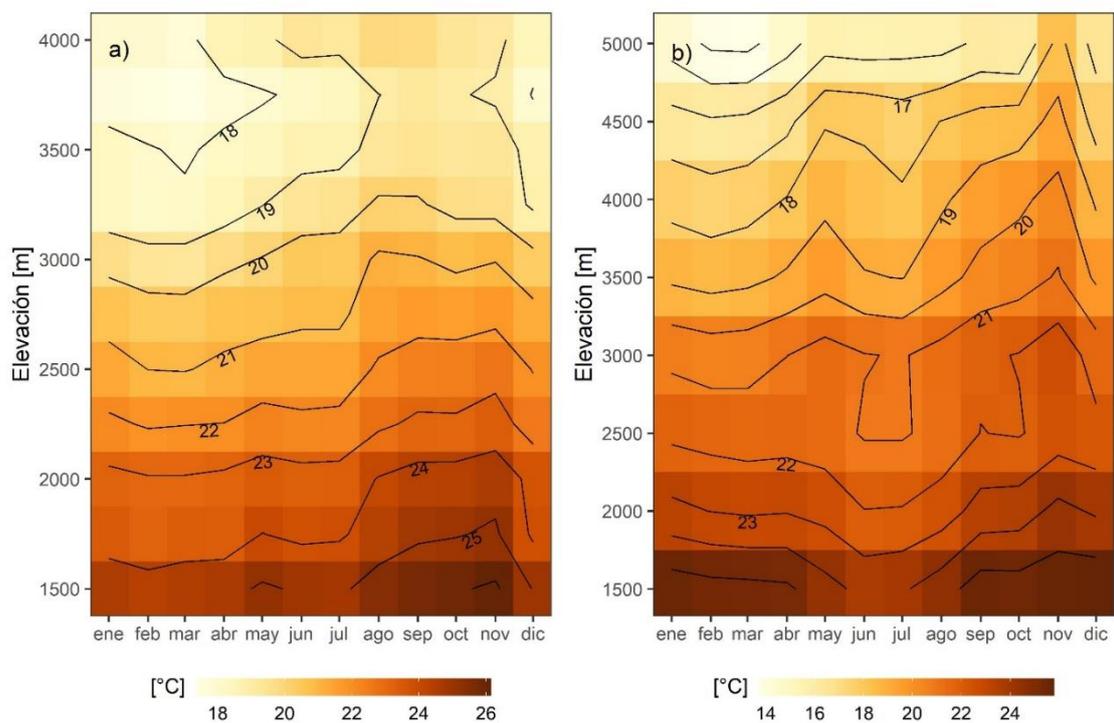


Figura 39: Estacionalidad por altitud de la temperatura máxima en a) Cajamarca y b) Cusco

4.11 Análisis de las condiciones climáticas medias durante el periodo seco

Se calculó la precipitación (mm) y temperatura máxima promedio (°C) durante la temporada de estiaje (mayo-setiembre) para estimar el comportamiento de estos patrones climáticos durante los años donde el mayor número de incendios se registraron en Cajamarca (Figura 40a) y Cusco (Figura 40b). En Cajamarca, durante el 2005 se registró ~70 mm de lluvia, con una temperatura máxima de ~24 °C. En la temporada seca del 2016 se alcanzó una precipitación de ~78 mm y una temperatura máxima de ~25°C. Por otro lado, en Cusco, en el año 2005 la lluvia registrada fue de ~112 mm, con temperatura máxima de ~22 °C. Asimismo, en la temporada seca del 2010 se alcanzó alrededor de los 127 mm y una temperatura máxima de ~23°C. Se observa que, en ambas regiones, durante los años en que coincidieron las sequías extremas y el incremento severo de incendios, se repitieron condiciones de precipitación, los cuales se encontraron por debajo del promedio registrado y temperaturas máximas estuvieron por encima de lo normal. Aun así, la relación entre el incremento de incendios forestales con los niveles de precipitación y temperatura máxima aún no es clara, pues condiciones similares se presentaron en otros años en ambas regiones. Si bien las condiciones atmosféricas como las bajas precipitaciones y altas temperaturas, propias del periodo de estiaje, pueden contribuir para el desencadenamiento de incendios forestales, al condicionar los niveles de humedad en el ambiente (García y García, 1987; Smith, 2006), las quemadas agropecuarias no controladas son las actividades determinantes para el incremento severo de incendios, al ser responsables de más del 90% de estos eventos en los Andes peruanos (USAID, 2015; Manta, 2017; SERFOR, 2018). Estos factores sociales como agente ignición podrían responder a que en el 2010 en Cajamarca y 2016 en Cusco, pese a que se presentaron niveles de precipitación por debajo de lo normal y temperaturas máximas por encima del promedio, no se registraran un número elevado de incendios forestales. Por lo tanto, es importante estudiar otras variables que puedan responder mejor a la asociación clima-vegetación como condicionantes al incremento severo de estos eventos, como la frecuencia de días secos (DDF), frecuencia de días calurosos (HDF) o precipitación acumulada (PA), parámetros climáticos que resultarían más prácticos para inferir impactos de las sequías sobre la vegetación e incrementos severos de incendios forestales ante una disminución de la humedad en la vegetación, el suelo y la atmósfera, los cuales permiten que el fuego producido en las quemadas agropecuarias, principalmente, se expandan con facilidad sobre los ecosistemas naturales andinos (Espinoza et al., 2016; SENAMHI, 2018; IGP, 2020).

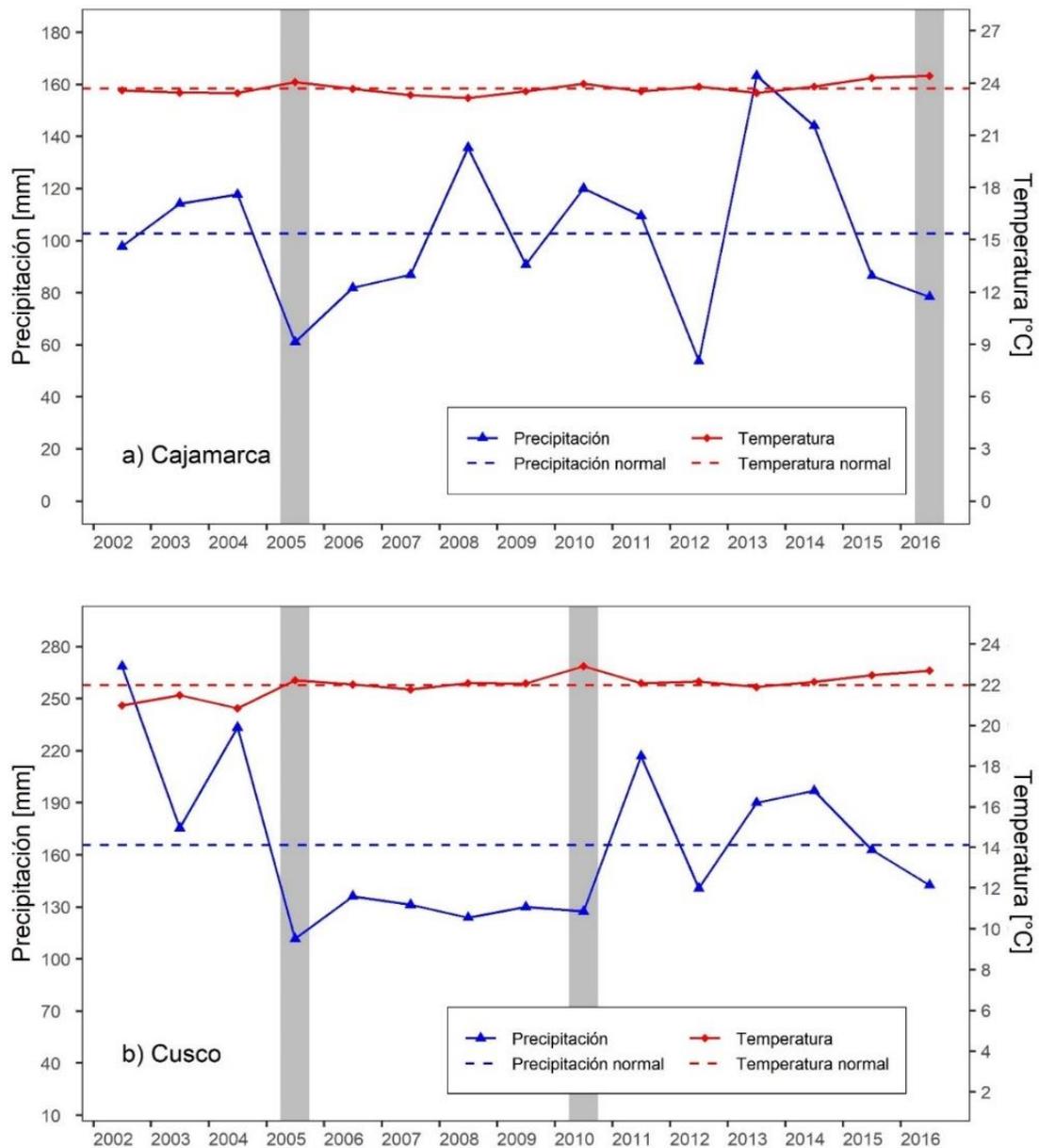


Figura 40: Precipitación acumulada (mm) y temperatura máxima promedio (°C) durante la temporada de estiaje (mayo-setiembre) en a) Cajamarca y b) Cusco (en gris se señalan los años donde se registraron mayor número de incendios)

4.12 Estimación de umbrales de precipitación y temperatura para el análisis de periodos secos y calurosos

Si bien las sequías están relacionadas principalmente con la reducción de la cantidad de lluvia recibida durante un periodo de tiempo prolongado, estos eventos pueden manifestarse con incrementos de la temperatura máxima por encima de lo normal (Mishra y Singh 2010; SENAMHI, 2017; Gutierrez, 2018). La ausencia de una definición cuantitativa (magnitud y duración) ha originado que estudios sobre la frecuencia de días secos/húmedos (Espinoza et al., 2016; Liu et al., 2015; McCabe et al., 2010) consideren umbrales relativos (0.1, 1 y 2 mm) sin considerar la variabilidad de los patrones climáticos y orográficos. Un incremento de los días consecutivos sin lluvia y una marcada estación seca con altas temperaturas, hacen posible que se generen condiciones favorables a los incendios (García y García, 1987; Smith, 2006). Por lo tanto, se ha propuesto los umbrales de días secos y días calurosos, entre los distintos métodos de cuantificación, por medio de la distribución por deciles de precipitación y temperatura máxima a una escala diaria para un mes en específico durante en el periodo 2002-2016. En la Figura 41 se muestra la distribución de precipitación media diaria entre enero y diciembre para las vegetaciones de pastizales andinos, matorrales andinos y bosques naturales de Cajamarca y Cusco, en el que los valores por debajo del primer decil, son considerados como un día seco. Asimismo, en la Figura 42 se muestra la distribución del promedio de la temperatura máxima diaria, donde los valores por encima del noveno decil, son considerados como un día caluroso.

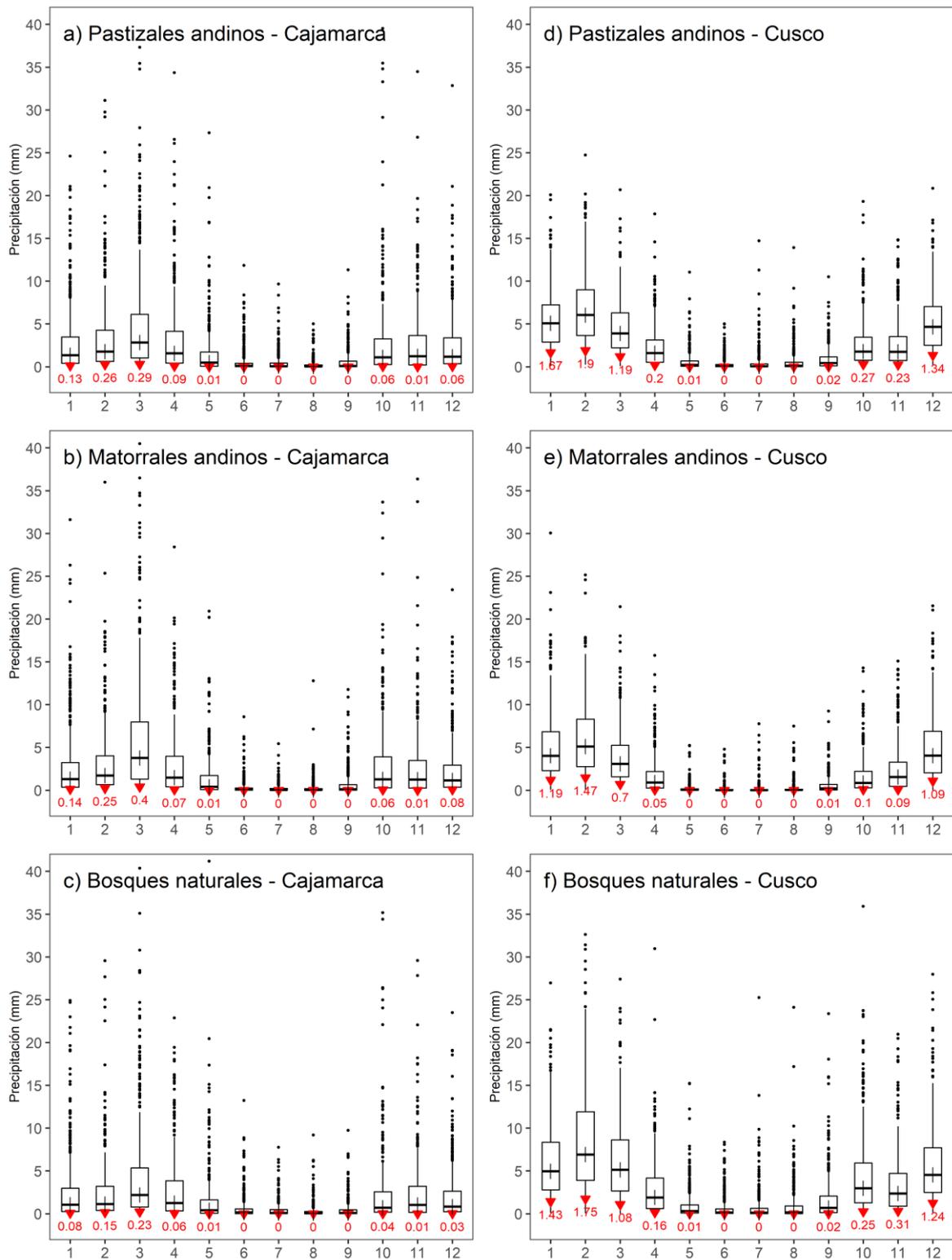


Figura 41: Diagrama de cajas de precipitación diaria (enero-diciembre) y umbrales que definen los días calurosos, establecidos por el decil 1 (triángulos y números rojos) para pastizales andinos, matorrales andinos y bosques naturales en Cajamarca (a,b y c, respectivamente) y Cusco (d,e y f, respectivamente)

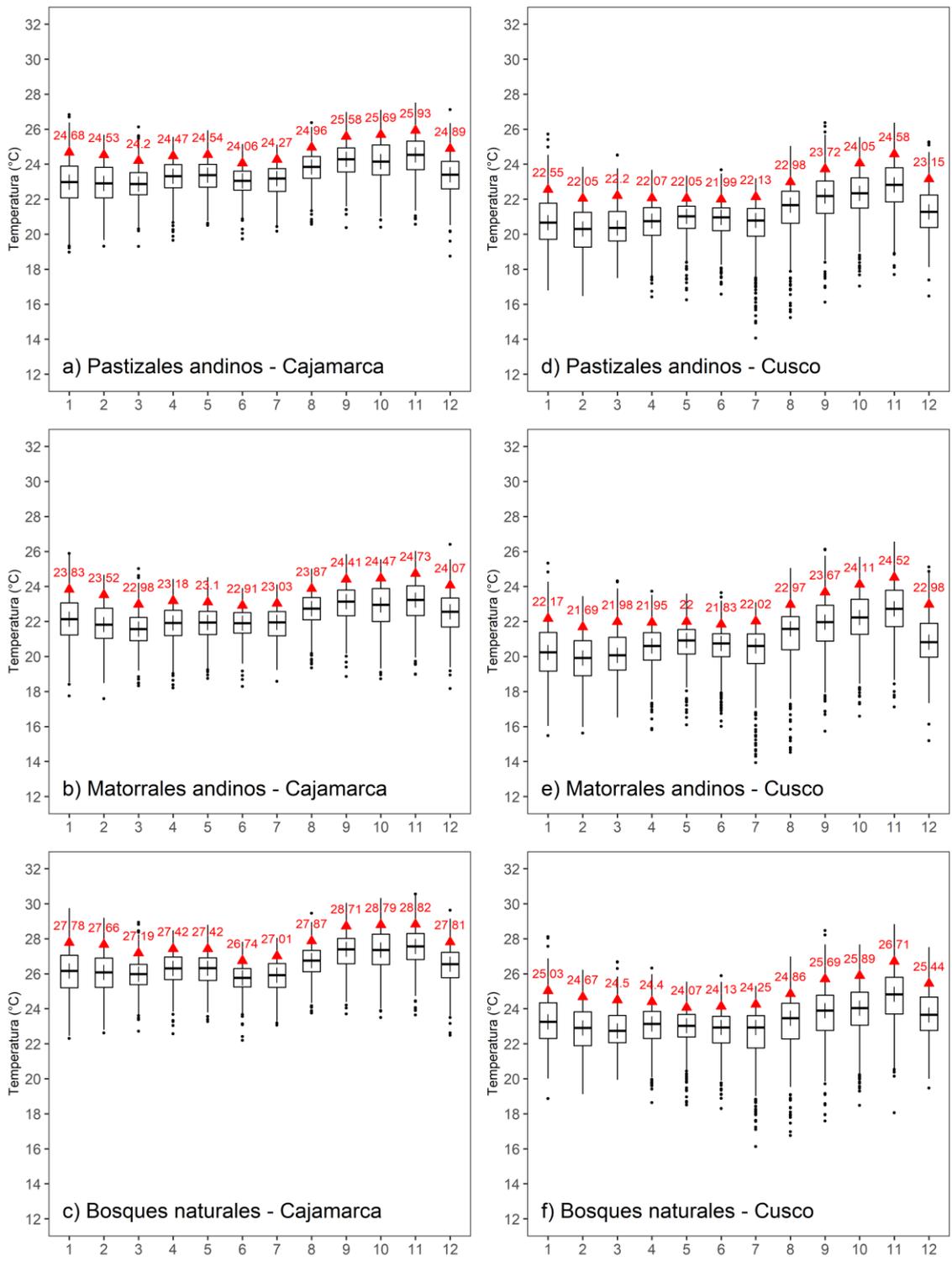


Figura 42: Diagrama de cajas de temperatura máxima diaria (enero-diciembre) y umbrales que definen los días calurosos, establecidos por el decil 9 (triángulos y números rojos) para pastizales andinos, matorrales andinos y bosques naturales en Cajamarca (a,b y c, respectivamente) y Cusco (d,e y f, respectivamente)

4.13 Evaluación de parámetros climáticos

Debido a la variabilidad climática intraestacional, asociar la precipitación y temperatura directamente a los problemas de incendios forestales podrían conllevar a una interpretación limitada de las condiciones que favorecen a su desencadenamiento. De esta manera, frecuencias acumulativas de estas variables han sido evaluadas con el objetivo de encontrar una mejor asociación entre el clima y el incremento de los incendios forestales sobre los ecosistemas altoandinos en la región Cajamarca y Cusco. Se analizó la evolución desde el inicio de la temporada de estiaje (mayo) de los parámetros climáticos precipitación acumulada (PA), frecuencia de días secos (DDF) y frecuencia de días calurosos (HDF) sobre las coberturas de pastizales andinos, matorrales andinos y bosques naturales, fundamentalmente durante los años extremos del 2005, 2010 y 2016, los cuales tuvieron alcance en los Andes (Espinoza et al., 2011; Erfanian et al., 2017; Jimenez et al., 2019).

La evolución de la PA sobre la vegetación de pastizales andinos (Figura 43a), matorrales andinos (Figura 43b) y bosques naturales (Figura 43c) en Cajamarca presenta un desarrollo y magnitudes similares. En el 2005 los niveles alcanzados en casi toda la época seca (mayo-setiembre) se encontraron cerca de los mínimos históricos (<60 mm). Durante el 2010, hasta finales de octubre la precipitación acumulada se mantuvo similar al promedio, seguido de un ligero descenso entre noviembre-diciembre. En el 2016, hasta finales de agosto el desarrollo de la PA se aproximó a los mínimos registrados (<60 mm), recuperándose hasta la mitad de octubre, en el que alcanzó los niveles normales (~140 mm), para luego decrecer considerablemente en relación a los mínimos históricos registrado (<260 mm) hasta el término del año. Asimismo, sobre los tipos de vegetación en la región Cusco la evolución que presenta la PA durante los años 2005, 2010 y 2016 también fue bastante similar. En los pastizales andinos (Figura 43d), matorrales andinos (Figura 43e) y bosques naturales (Figura 43f), entre mayo y setiembre, las precipitaciones acumuladas se encuentran cercanas a las mínimas registradas en el periodo analizado, siendo estos ~60 mm, ~20 mm y ~110 mm, respectivamente. Entre octubre y noviembre este parámetro evoluciona con un leve incremento cercano al promedio, para luego, hasta finales de diciembre, presentar valores cercanos a los mínimos registrados. Estos fueron ~350 mm, sobre los pastizales andinos, ~270 mm, sobre los matorrales andinos, y 500 mm, sobre los bosques naturales, principalmente durante los años 2005 y 2010.

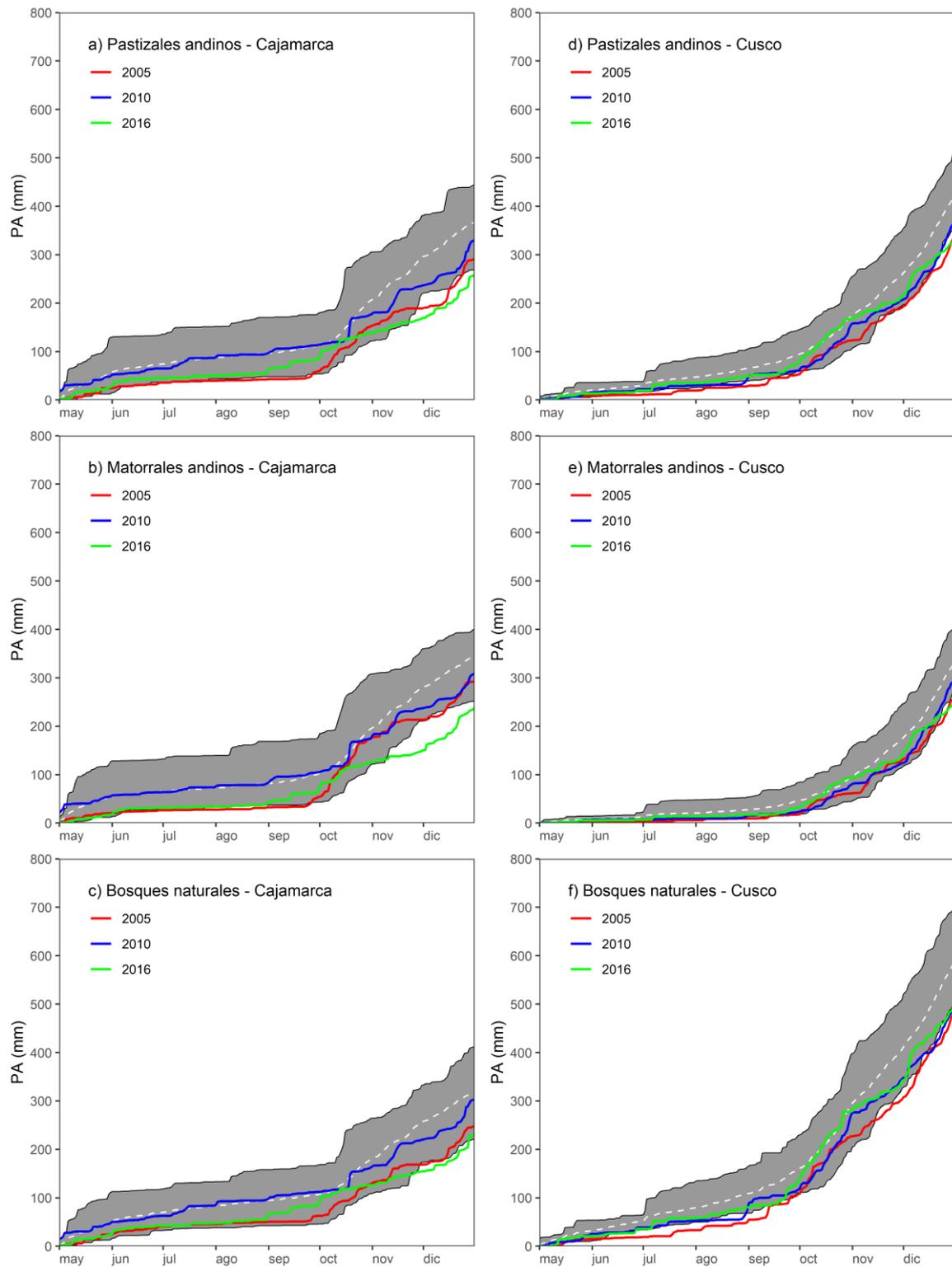


Figura 43: Evolución de la precipitación acumulada (PA) para el período 2002-2016 (región gris) y durante los años de sequía extrema 2005, 2010 y 2016, para pastizales andinos, matorrales andinos y bosques naturales en Cajamarca (a, b y c, respectivamente) y Cusco (d, e y f, respectivamente). La línea blanca representa el promedio del parámetro en años normales

El desarrollo de la DDF sobre la vegetación en Cajamarca muestra que para los pastizales andinos (Figura 44a), matorrales andinos (Figura 44b) y bosques naturales (Figura 44c) a inicios de agosto, mes en el que inicia el incremento de incendios forestales, del 2005, se registraron 24, 21 y 22 días sin lluvia, respectivamente, los cuales fueron los máximos del periodo analizado. Este incremento se mantuvo durante todo el año, particularmente a finales de noviembre, donde lo registrado fue superior en 25, 22 y 20 días, respecto al promedio. Durante el 2010, tanto para los pastizales andinos, matorrales andinos y bosques naturales, la evolución de la DDF entre mayo y agosto no tuvo gran diferencia en relación a la normal. A partir de esto, se observa un incremento por encima del promedio durante el resto del año para las vegetaciones evaluadas. En el 2016 se manifiesta un incremento que se mantiene desde la mitad del mes de junio hasta finales de diciembre. A finales de agosto se registraron 18, 15 y 16 días secos en los pastizales andinos, matorrales andinos y bosques naturales, respectivamente, desde el inicio del periodo de estiaje; mientras que a finales de noviembre, mes en el que se registran más incendios forestales en la región, se habían alcanzado 30, 29 y 34 días sin lluvia, respectivamente. Por otro lado, en la región Cusco, se observa que el desarrollo de la DDF sobre los pastizales andinos (Figura 44d) a inicios de julio del 2005 ya se venían presentando un número de días sin precipitaciones superiores al promedio (>7 días), mientras que en el 2010 este incremento se da desde inicios de agosto (>10 días). En ambos casos la frecuencia de días secos siguió aumentando hasta finales del año, acumulándose hasta noviembre, mes donde el periodo de incendios finaliza en la región, 33 días sin lluvias. Sobre los matorrales andinos (Figura 44e), hasta los inicios de julio del 2005, mes en el que inicia la temporada de incendios forestales en este departamento, la DDF acumulada fue de 11 días, mientras que al final de noviembre se registró un total de 32 días sin precipitación. A inicios de agosto del 2010, la evolución de la DDF estuvo por encima de lo normal (>9 días), crecimiento que se mantuvo durante el resto de la temporada de incendios forestales. Respecto a los bosques naturales (Figura 44f), se observa que la frecuencia de días secos desarrollada durante el 2005 y 2010 tiende a crecer considerable desde inicios de agosto (>10 días) hasta fines de diciembre, fundamentalmente en el 2010, año en que se registró el mayor número de días sin lluvias importantes de todo el periodo analizado (41 días)

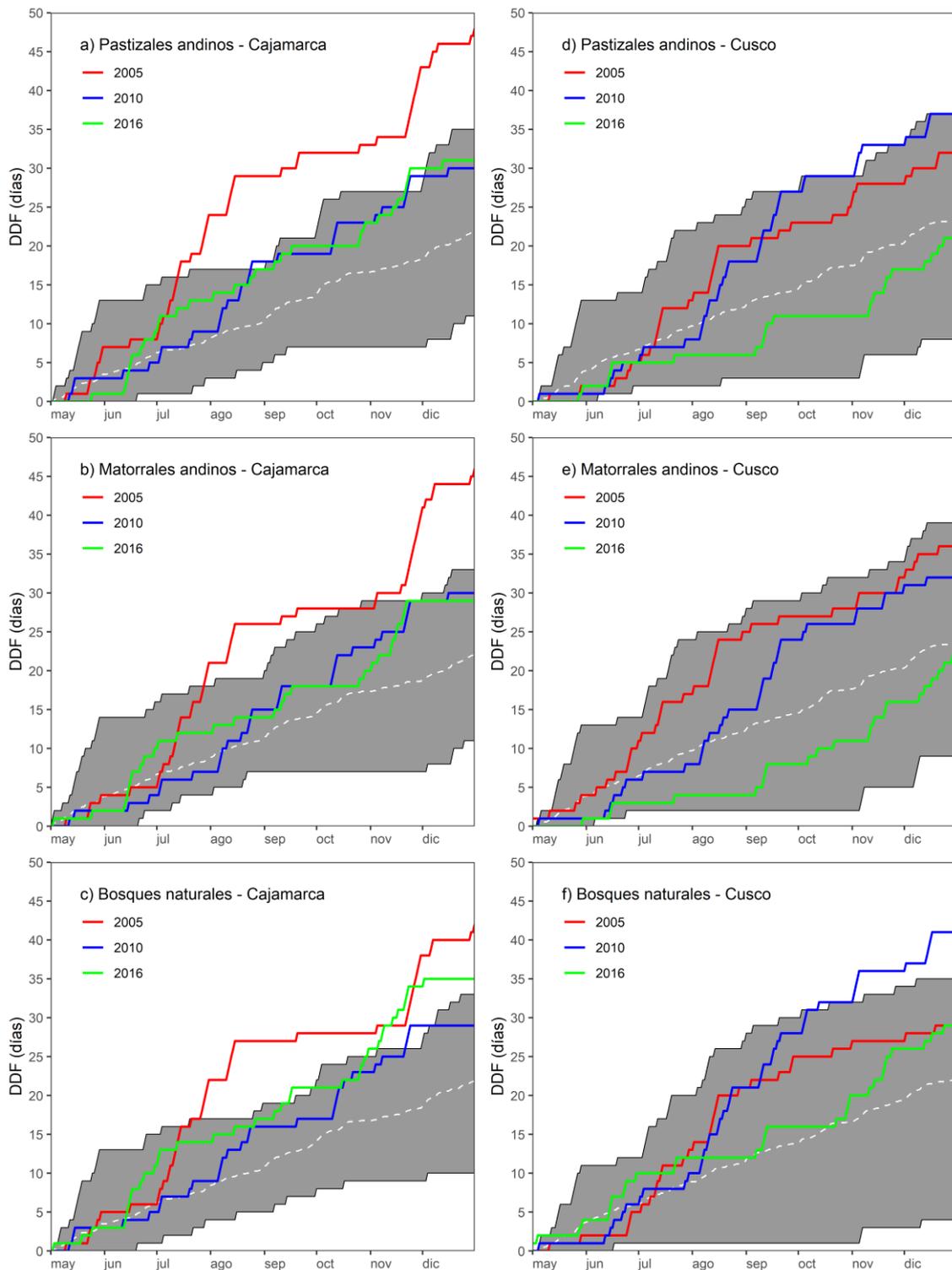


Figura 44: Evolución de la frecuencia acumulada de días secos (DDF) para el período 2002-2016 (región gris) y durante los años de sequía extrema 2005, 2010 y 2016, para pastizales andinos, matorrales andinos y bosques naturales en Cajamarca (a, b y c, respectivamente) y Cusco (d, e y f, respectivamente). La línea blanca representa el promedio del parámetro en años normales

La evolución de la HDF en la región Cajamarca indica que durante el 2005 y 2010, sobre los pastizales andinos (Figura 45a), matorrales andinos (Figura 45b) y bosques naturales (Figura 45c), existe un incremento por encima del promedio desde inicios de mayo hasta finales de agosto, donde se resalta lo ocurrido sobre la vegetación de matorrales andinos, debido a que se acumularon días calurosos superiores al histórico registrado en años normales (>24 días). Si bien se observa que el incremento de días calurosos se mantiene por encima del promedio durante casi todo el resto del 2005 y 2010, este no es tan pronunciado como en otros años. Entre el inicio y final del periodo de estiaje (mayo-setiembre) del 2016 se alcanzaron los máximos históricos en la HDF sobre los pastizales andinos, matorrales andinos y bosques naturales, siendo estos 42, 39 y 40 días, respectivamente. Por otro lado, en la región Cusco, la evolución de la HDF sobre las vegetaciones evaluadas presenta un desarrollo similar. Durante el 2005, si bien se observan valores por encima del promedio desde el inicio de la época de estiaje, este crecimiento no es tan pronunciado como se manifiesta en el 2010 y 2016, años en los que al final de la temporada de seca (setiembre) ya la HDF alcanzó valores superiores a los máximos en años normales, siendo estos de mayores a 40 días sobre los pastizales andinos (Figura 45d), mayores a 39 días matorrales andinos (Figura 45e) y mayores a 40 días sobre los bosques naturales (Figura 45f), crecimiento que se sostuvo durante el resto del 2010 y 2016.

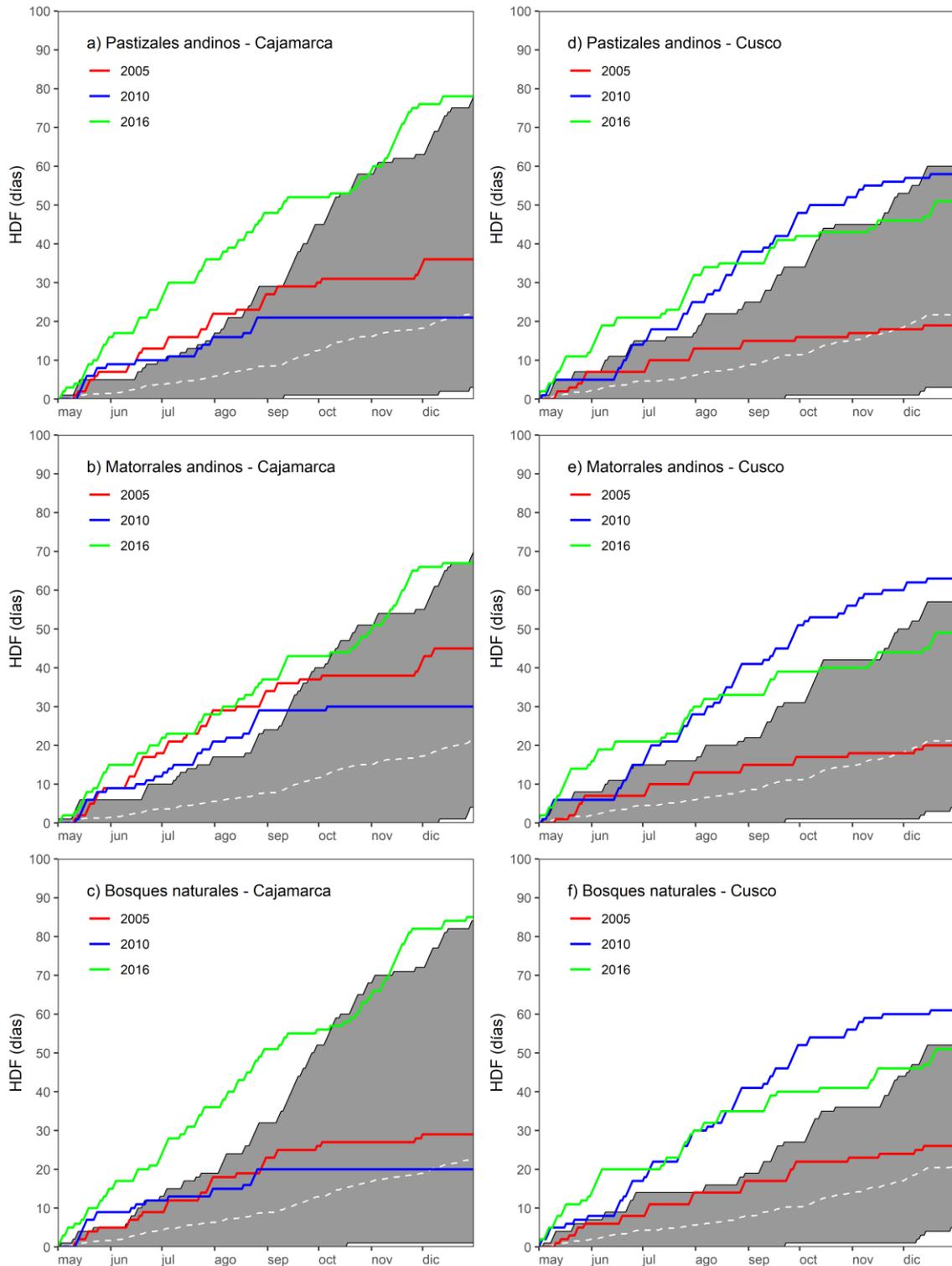


Figura 45: Evolución de la frecuencia acumulada de días calurosos para el período 2002-2016 (región gris) y durante los años de sequía extrema 2005, 2010 y 2016, para pastizales andinos, matorrales andinos y bosques naturales en Cajamarca (a,b y c, respectivamente) y Cusco (d,e y f, respectivamente). La línea blanca representa el promedio del parámetro en años normales

El diagrama de cajas de la evolución mensual de la PA en los pastizales andinos (Figura 46a), matorrales andinos (Figura 46b) y bosques naturales (Figura 46c) de la región Cajamarca, muestra que entre mayo y diciembre de los años 2005 (puntos rojos) y 2016 (puntos verdes) la precipitación acumulada se mantuvo por debajo del primer cuartil ($PA < Q1$ [cuartil 1]) de lo registrado en años normales. Asimismo, sobre los pastizales andinos (Figura 46d), matorrales andinos (Figura 46e) y bosques naturales (Figura 46f) en la región Cusco, la evolución mensual de la PA durante el 2005 (puntos rojos) y 2010 (puntos azules) también se sostuvo por debajo del primer cuartil ($PA < Q1$) de lo registrado entre mayo-diciembre de los años normales.

El diagrama de cajas del desarrollo mensual de la DDF en Cajamarca sobre la vegetación de pastizales andinos (Figura 47a), matorrales andinos (Figura 47b) y bosques naturales (Figura 47c) muestra que durante el 2005 los días sin lluvia que se acumularon entre julio y diciembre presentó valores muy superiores a lo que se señala en años normales (categorizados incluso como valores atípicos); asimismo, en el 2016 se evidencia una clara tendencia a mantener valores por encima del tercer cuartil ($DDF > Q3$ [cuartil 3]) de lo registrado entre julio y diciembre en años normales. Por otro lado, sobre los pastizales andinos (Figura 47d), matorrales andinos (Figura 47e) y bosques naturales (Figura 47f) del departamento de Cusco, a partir de agosto del 2005 y 2010 existe una clara diferenciación en la cantidad de días sin precipitaciones que se contaron, los cuales se mantuvieron por encima del tercer cuartil ($DDF > Q3$) hasta finales de los años normales, principalmente durante el 2010, donde el desarrollo de la DDF fue superior a lo registrado en el 2005 entre setiembre y diciembre.

El diagrama de cajas de la evolución mensual de la HDF en la región Cajamarca sobre la vegetación de pastizales andinos (Figura 48a) y bosques naturales (Figura 48c) evidencia que entre los meses de mayo y diciembre de los años 2005 y 2016 el incremento de días calurosos se desarrolló con valores muy superiores a los máximos registrados en años normales, fundamentalmente durante el 2016. Respecto al crecimiento de la frecuencia de días calurosos sobre los matorrales andinos (Figura 48b) de esta región, la evolución de la HDF es bastante similar a las vegetaciones descritas anteriormente, adicionando que durante el 2010 también se desarrolló un comportamiento anómalo por encima de lo observado en años normales. Asimismo, en la región Cusco, el desarrollo mensual de la HDF sobre los pastizales andinos (Figura 48d), matorrales andinos (Figura 48e) y bosques naturales (Figura 48f) durante el 2010 y 2016, evidencia que los días calurosos acumulados entre mayo y

diciembre fueron bastante superiores a lo observado en años normales. En el 2005, el incremento de la HDF entre mayo y octubre sobre los pastizales andinos y matorrales andinos estuvo por encima del tercer cuartil ($HDF > Q3$), para luego alcanzar un desarrollo que se mantuvo por encima del segundo cuartil o mediana ($HDF > Q2$ [cuartil 2]). Asimismo, sobre los bosques naturales, entre mayo y diciembre de este año, el incremento de la frecuencia de días calurosos se sostuvo por encima del tercer cuartil ($HDF > Q3$) de lo registrado en años normales.

Los resultados sobre el desarrollo de la precipitación acumulada, frecuencia de días secos y frecuencia de días calurosos sobre vegetaciones como los pastizales andinos, matorrales andinos y bosques naturales de Cajamarca y Cusco, desde la época de estiaje hasta el inicio de la temporada en los años de sequía extrema en la cuenca andina-amazónica (2005, 2010 y 2016), evidenciarían que el alto número de días con ausencia de precipitaciones de manera consecutiva y las lluvias acumuladas por debajo del promedio, sumados a la persistencia de días en que la temperatura máxima registrada alcanzó valores anómalos, podrían estar asociados con el incremento severo de incendios forestales durante estos años, debido a la estrecha relación entre los niveles de sequedad extrema en la vegetación y el ambiente (suelo y atmósfera) durante años de sequía, con el aumento del combustible forestal adecuado para el desarrollo del fuego producido durante las quemas agropecuarias sobre ecosistemas de vegetación corta como en los Andes peruanos (Torres et al., 2008; Román-Cuesta et al., 2014; Ramos et al., 2017; Manta, 2017).

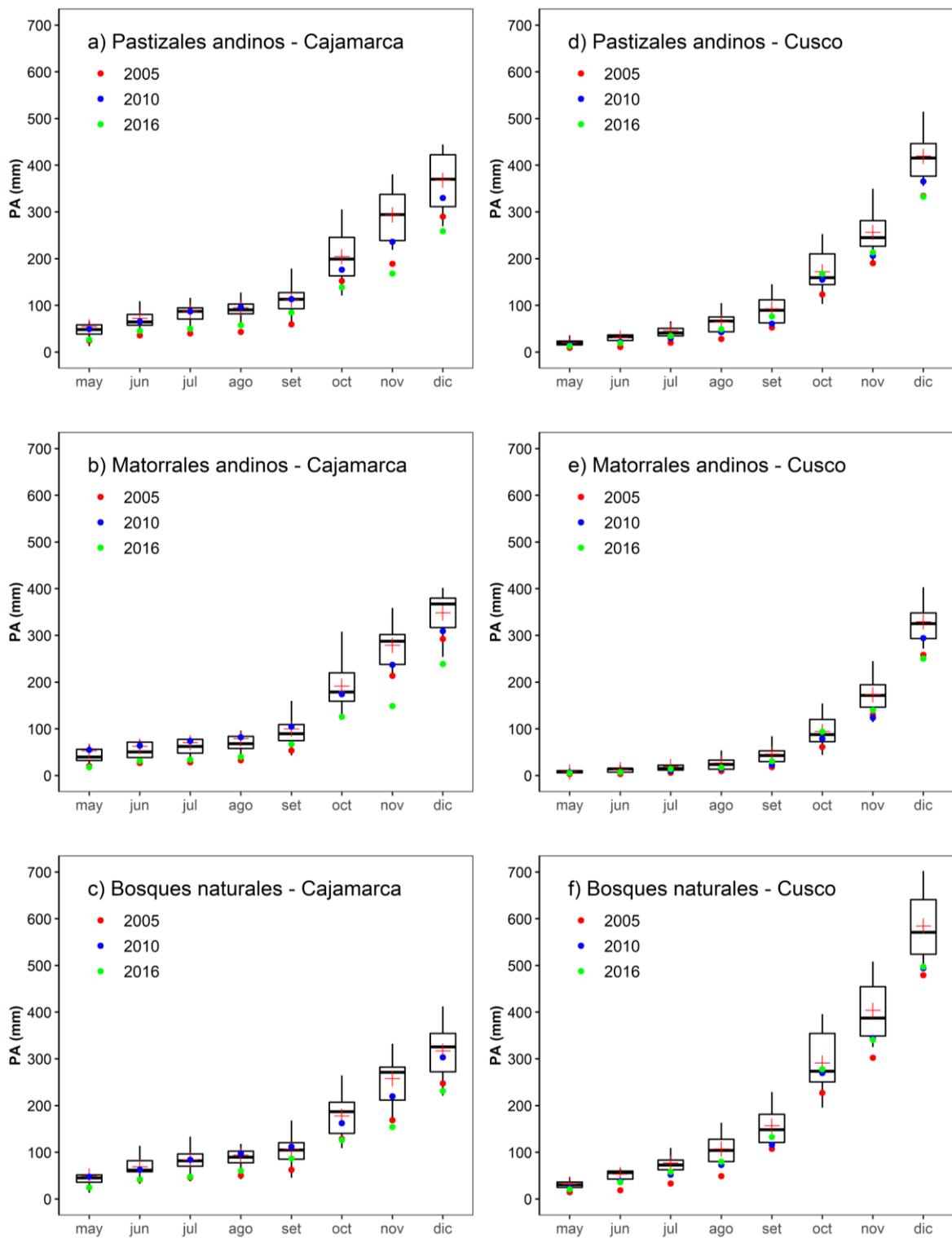


Figura 46: Diagrama de cajas de la distribución mensual de la precipitación acumulada (PA) para el período 2002-2016, para pastizales andinos, matorrales andinos y bosques naturales en Cajamarca (a,b y c, respectivamente) y Cusco (d,e y f, respectivamente). Se resaltan los años de sequía extrema 2005 (puntos rojos), 2010 (puntos azules) y 2016 (puntos verdes), además de la media mensual (cruz roja)

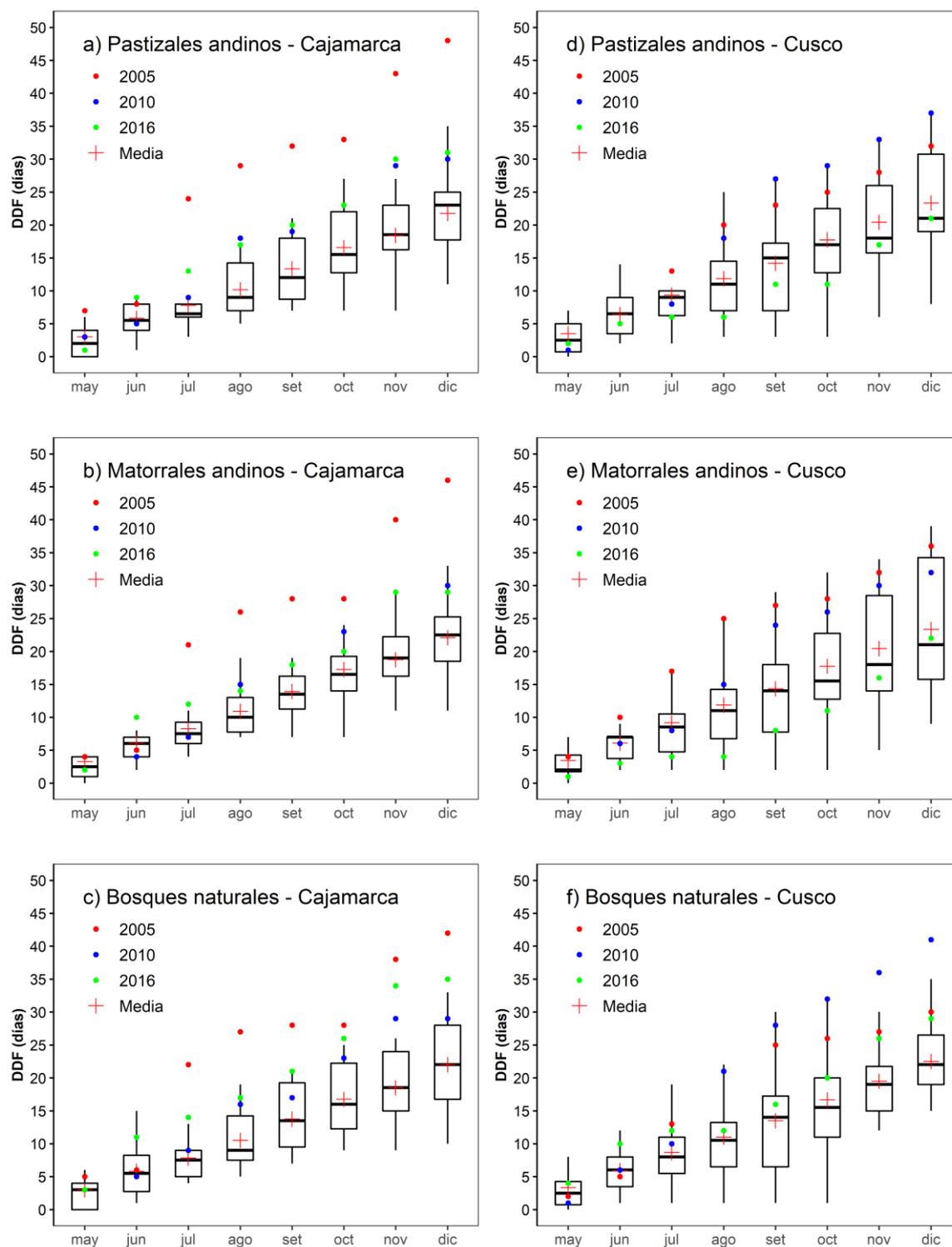


Figura 47: Diagrama de cajas de la distribución mensual de la frecuencia de días secos (DDF) para el período 2002-2016, para pastizales andinos, matorrales andinos y bosques naturales en Cajamarca (a,b y c, respectivamente) y Cusco (d,e y f, respectivamente). Se resaltan los años de sequía extrema 2005 (puntos rojos), 2010 (puntos azules) y 2016 (puntos verdes), además de la media mensual (cruz roja)

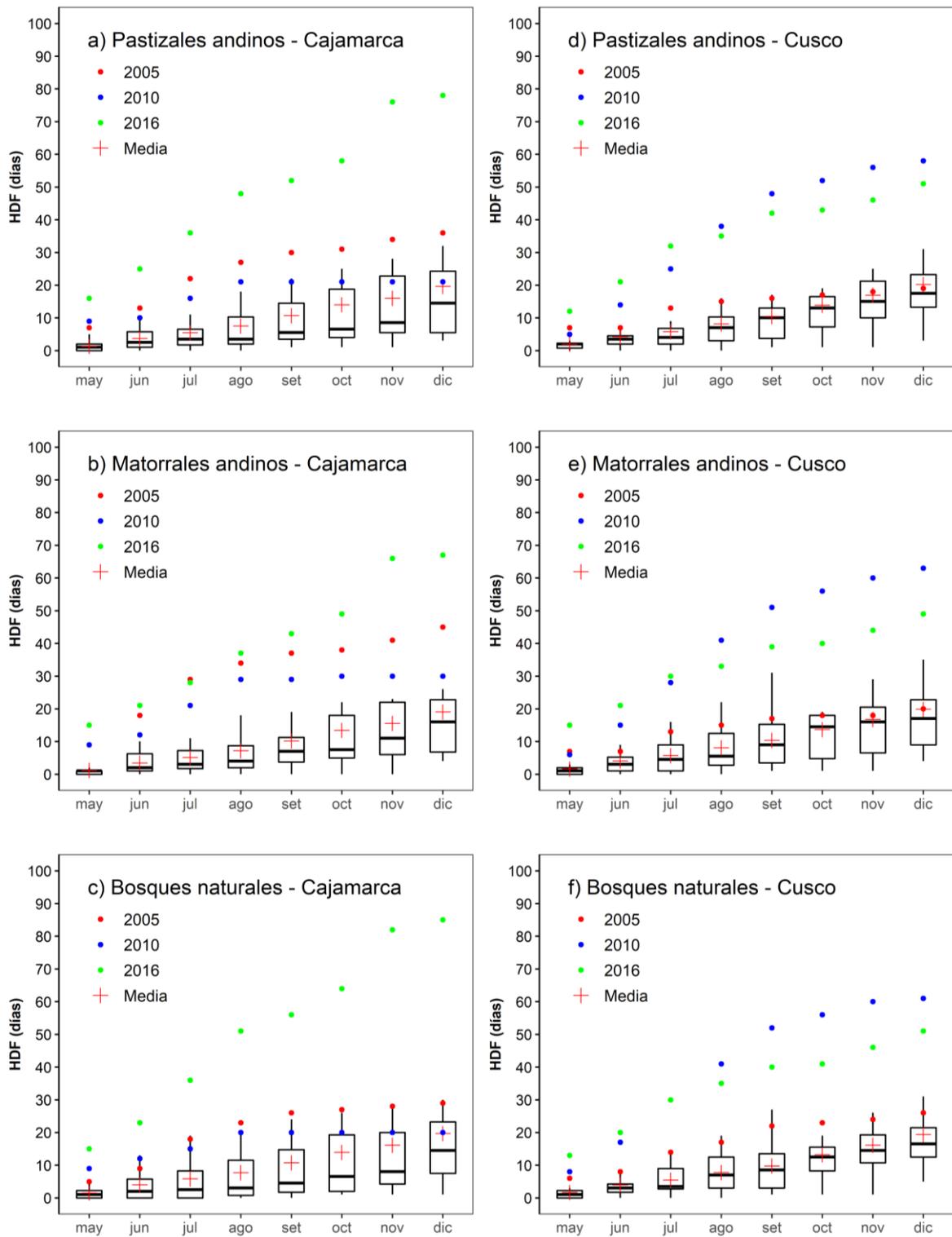


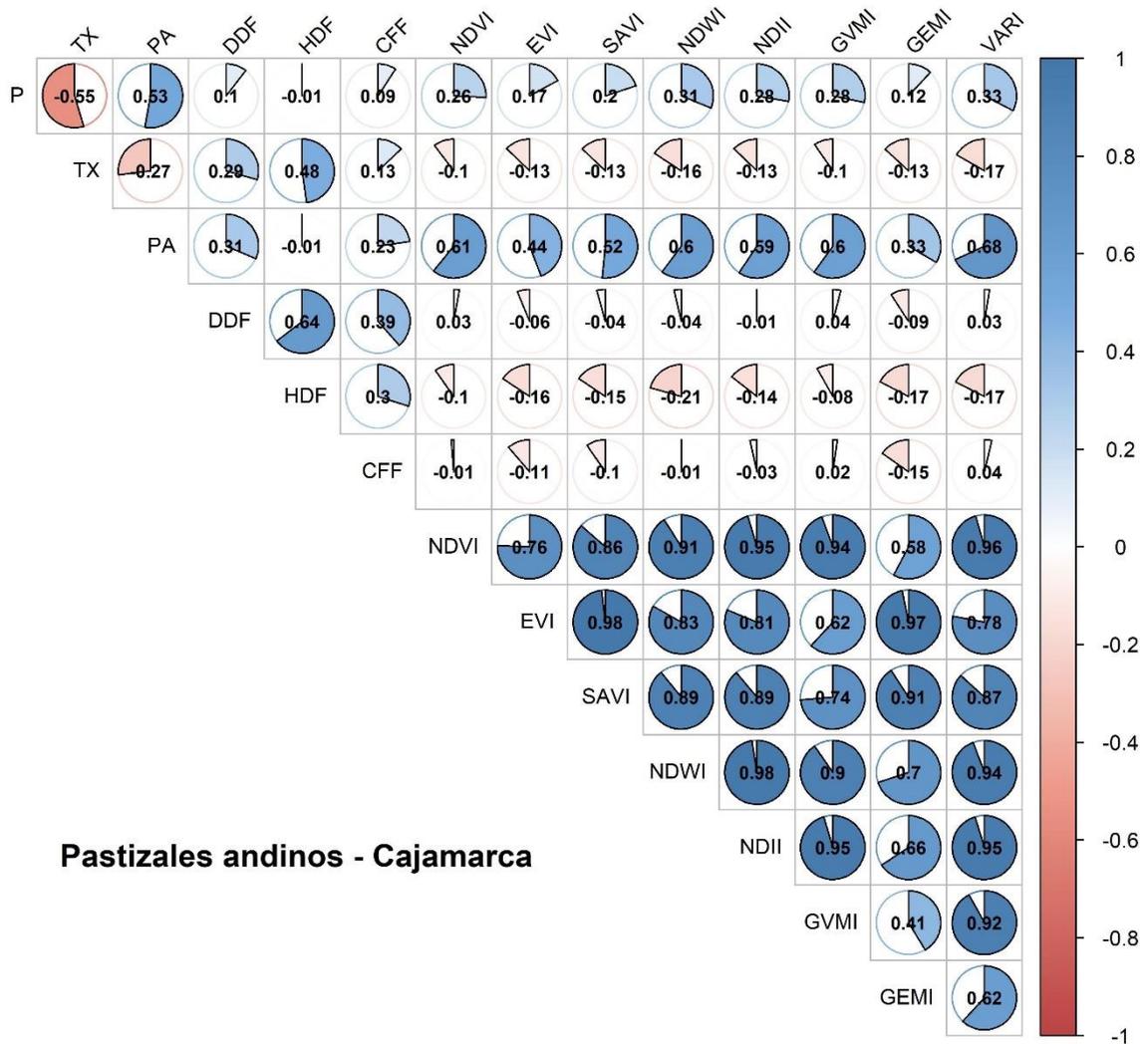
Figura 48: Diagrama de cajas de la distribución mensual de la frecuencia de días calurosos (HDF) para el período 2002-2016, para pastizales andinos, matorrales andinos y bosques naturales en Cajamarca (a,b y c, respectivamente) y Cusco (d,e y f, respectivamente). Se resaltan los años de sequía extrema 2005 (puntos rojos), 2010 (puntos azules) y 2016 (puntos verdes), además de la media mensual (cruz roja)

4.14 Correlación entre variables climáticas, parámetros climáticos e índices espectrales con la frecuencia acumulada de incendios forestales

Con el objetivo de analizar alguna relación existente entre la frecuencia acumulada de incendios forestales (CFF), precipitación (P), temperatura máxima (TX), precipitación acumulada (PA), frecuencia de días secos (DDF), frecuencia de días calurosos (HDF) e índices espectrales asociados a la vegetación (NDVI, EVI, SAVI, GEMI, NDWI, NDII, GVMÍ y VARI). En función al periodo en que se desarrollan los incendios forestales en las regiones evaluadas, se ha generado una matriz de correlaciones de Pearson entre agosto-noviembre cada 8 días (esto en función a que la serie de de los datos de los índices espectrales se encuentra con este intervalo de tiempo) para las vegetaciones en Cajamarca, y entre julio-noviembre cada 8 días para las vegetaciones de Cusco, de esta manera determinar qué parámetros o variables serían los más adecuados para el monitoreo de las condiciones favorables, climáticas y vegetativas, a la ocurrencia de incendios forestales en estos departamentos.

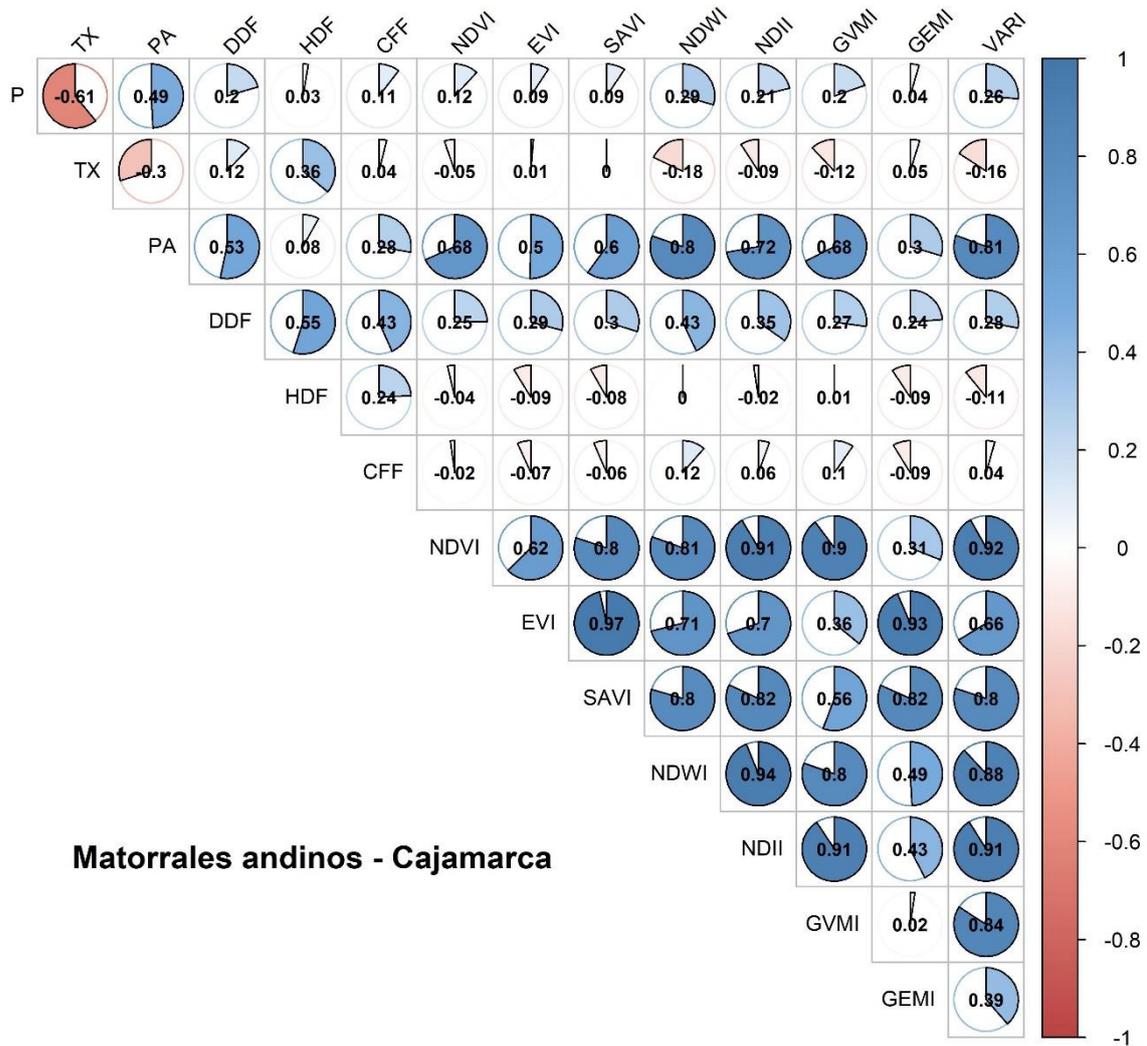
La Figura 49 corresponde a los pastizales andinos de la región Cajamarca, en ella se muestra una correlación positiva moderada entre la CFF con los parámetros climáticos DDF ($r=0.39$; $p<0.01$) y HDF (0.30 ; $p<0.01$), una correlación positiva débil con la PA ($r=0.23$) y correlaciones positivas menores a 0.2 con las variables climáticas P y TX. La Figura 50 indica que, sobre la vegetación de matorrales andinos en Cajamarca, la CFF obtiene una correlación positiva moderada con la DDF ($r=0.43$; $p<0.01$), correlaciones positivas débiles con la PA ($r=0.28$) y HDF ($r=0.24$) y correlaciones positivas por debajo de 0.2 con la P y la TX. Asimismo, la Figura 51 señala que la CFF en los bosques naturales de Cajamarca alcanza correlaciones positivas fuertes con la DDF ($r=0.61$; $p<0.01$) y HDF ($r=0.69$; $p<0.01$). Las correlaciones entre débiles y moderadas entre los parámetros climáticos y la frecuencia acumulada de incendios forestales que se presentan fundamentalmente sobre los pastizales andinos y matorrales andinos en Cajamarca, podrían explicarse debido a que, a diferencia de los parámetros climáticos cuyo desarrollo incrementa desde el primer mes del análisis (agosto), la frecuencia acumulada de incendios forestales se manifiesta con incrementos muy superiores durante noviembre sobre estas vegetaciones. Esto podría deberse a las actividades de quemadas agrícolas que acompañan la campaña de siembra que se intensifica entre octubre y diciembre en esta región (<https://www.minagri.gob.pe/portal/21-sector-agrario/agricola/>), los cuales son causantes principales de la ocurrencia de los incendios forestales (Vélez, 2000; Manta, 2017; SERFOR, 2018). Las bajas correlaciones

existentes entre la frecuencia acumulada de incendios forestales con la precipitación y temperatura máxima ($r < 0.2$) evidenciarían que las variables climáticas no serían las más adecuadas para el monitoreo de las condiciones climáticas favorables a la ocurrencia de estos eventos. Asimismo, se observan correlaciones nulas entre la CFF y el desarrollo de los índices espectrales durante el periodo analizado (agosto-noviembre), coherente con la evolución de las condiciones vegetativas que van disminuyendo entre mayo y setiembre (estiaje), para luego recuperarse debido al inicio de la temporada de lluvias (octubre-diciembre), mientras que la CFF se va incrementando desde agosto hasta noviembre. Adicionalmente, los bajos niveles de precipitación que se acumulan entre mayo y setiembre sobre las vegetaciones analizadas (Figura 43), seguido de un rápido crecimiento al dar inicio a la época de lluvias, respondería las correlaciones positivas fuertes que se presentan entre la PA y la mayoría de índices espectrales ($r > 0.5$; $p < 0.01$) sobre los pastizales andinos, matorrales andinos y bosques naturales de Cajamarca.



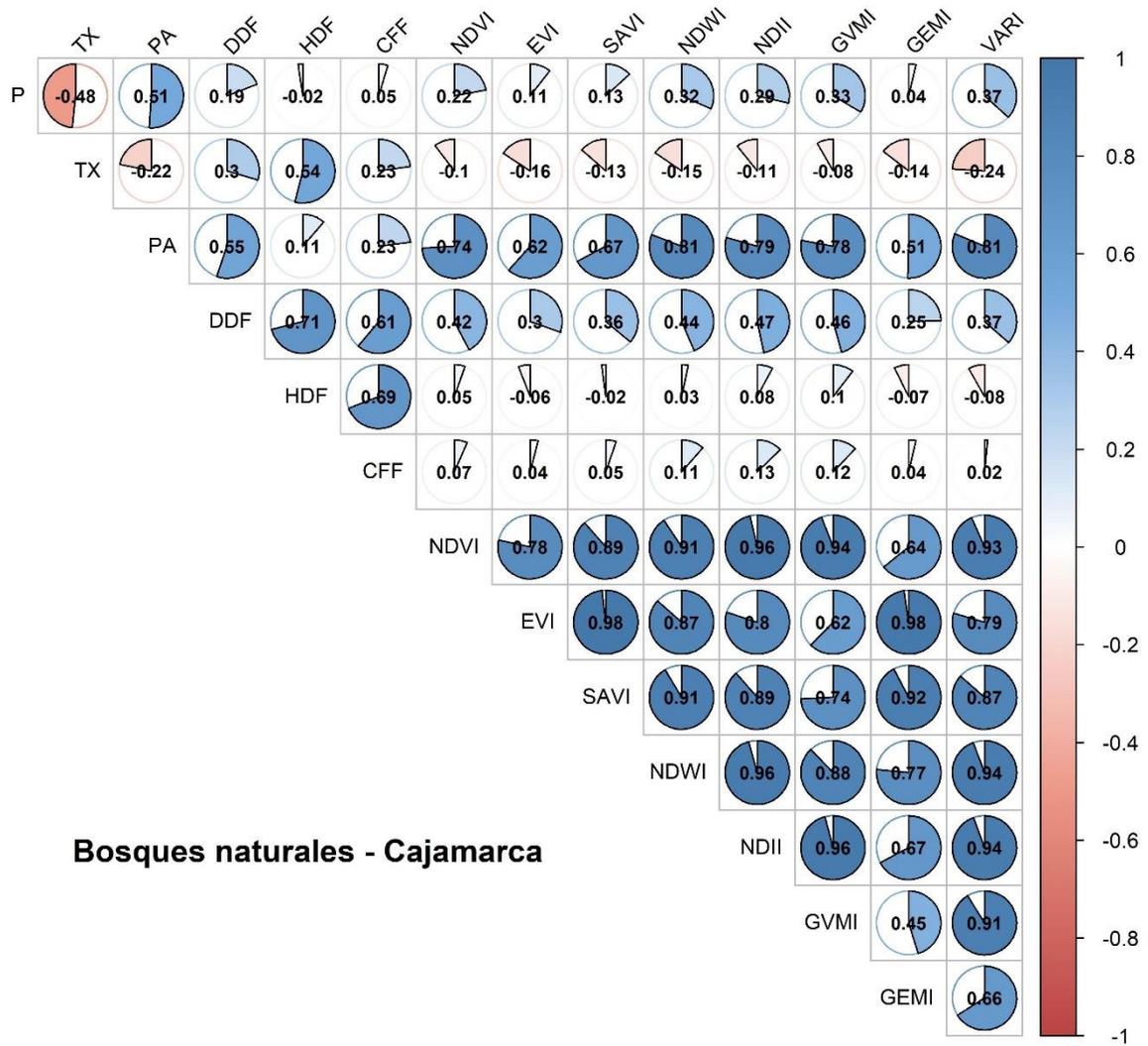
Pastizales andinos - Cajamarca

Figura 49: Matriz de correlaciones de frecuencia acumulada de incendios (CFF), variables climáticas: precipitación (P) y temperatura máxima (TX), parámetros climáticos: precipitación acumulada (PA), frecuencia de días secos (DDF) y frecuencia de días calurosos (HDF), y los índices espectrales (NDVI, EVI, SAVI, GEMI, NDWI, NDII, GVMI y VARI), obtenidos entre sí para el periodo agosto-noviembre para la vegetación de pastizales andinos en la región Cajamarca



Matorrales andinos - Cajamarca

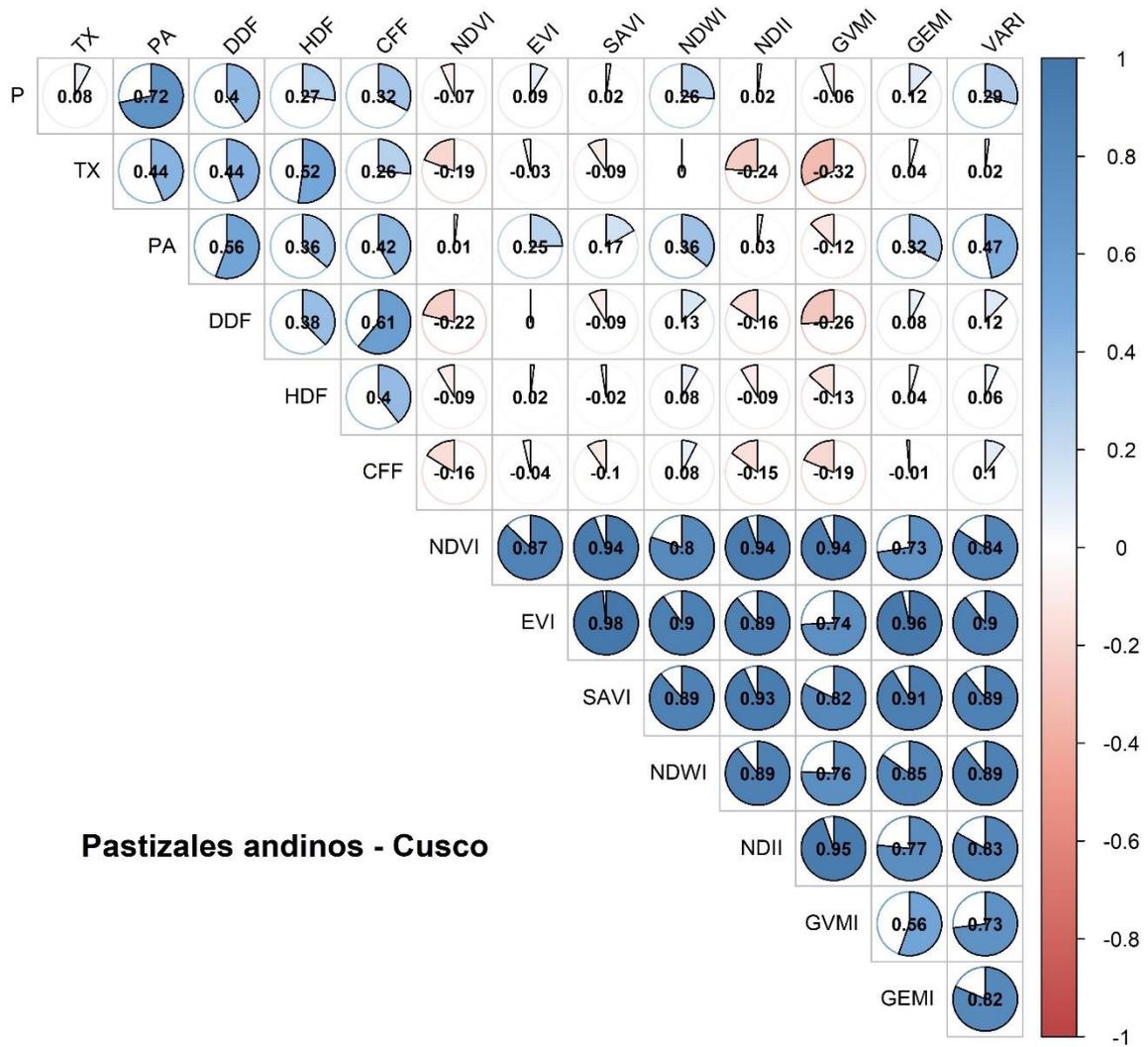
Figura 50: Matriz de correlaciones de frecuencia acumulada de incendios (CFF), variables climáticas: precipitación (P) y temperatura máxima (TX), parámetros climáticos: precipitación acumulada (PA), frecuencia de días secos (DDF) y frecuencia de días calurosos (HDF), y los índices espectrales (NDVI, EVI, SAVI, GEMI, NDWI, NDII, GVMI y VARI), obtenidos entre sí para el periodo agosto-noviembre para la vegetación de matorrales andinos en la región Cajamarca



Bosques naturales - Cajamarca

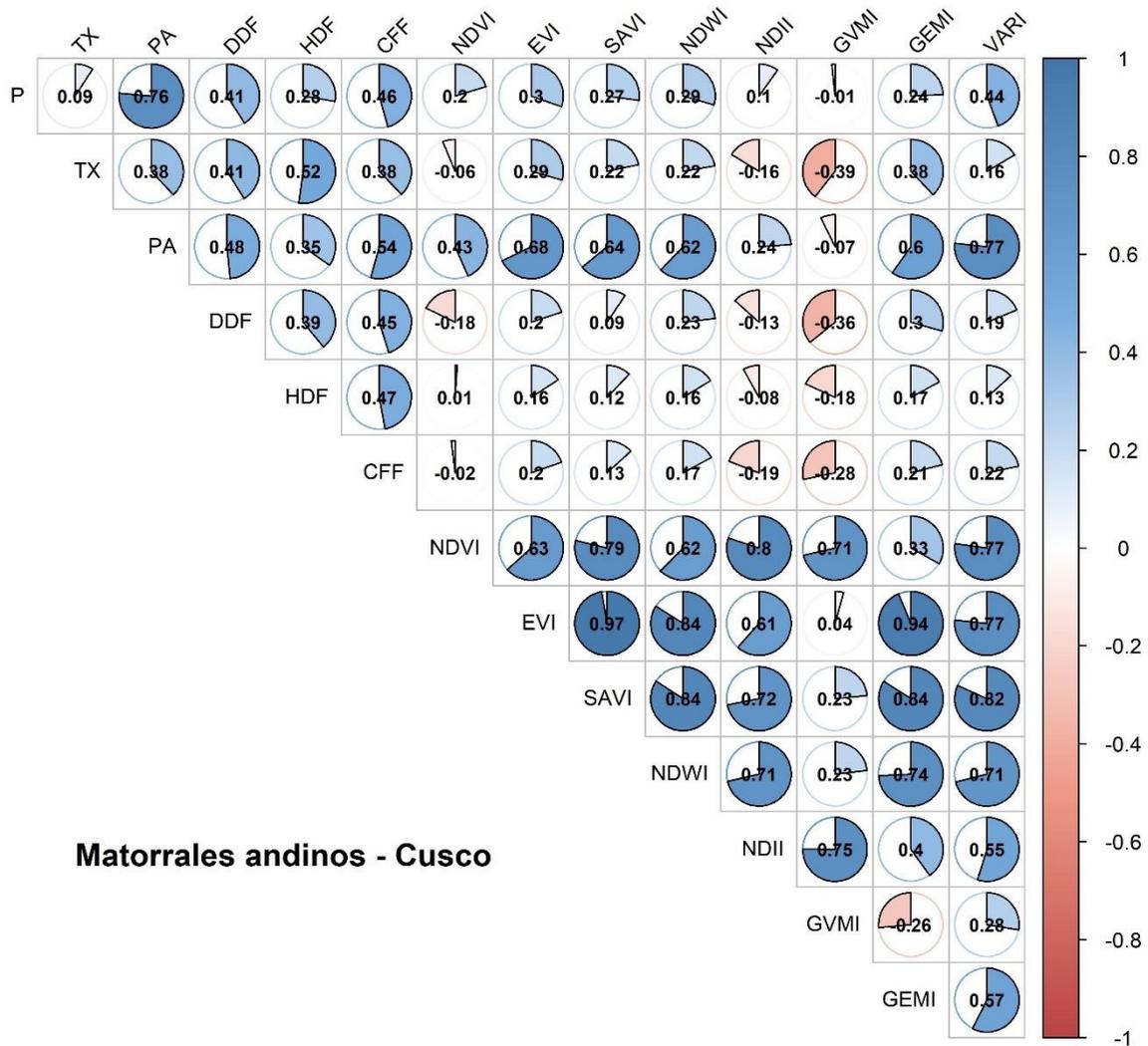
Figura 51: Matriz de correlaciones de frecuencia acumulada de incendios (CFF), variables climáticas: precipitación (P) y temperatura máxima (TX), parámetros climáticos: precipitación acumulada (PA), frecuencia de días secos (DDF) y frecuencia de días calurosos (HDF), y los índices espectrales (NDVI, EVI, SAVI, GEMI, NDWI, NDII, GVMI y VARI), obtenidos entre sí para el periodo agosto-noviembre para la vegetación de bosques naturales en la región Cajamarca

La Figura 52 corresponde a los pastizales andinos de la región Cusco indica que la CFF alcanza correlaciones positivas moderadas con PA ($r=0.42$; $p<0.01$) y la HDF ($r=0.40$; $p<0.01$), mientras que con la DDF se obtiene una correlación positiva fuerte de 0.61 ($p<0.01$). La Figura 53 muestra que sobre la vegetación de matorrales andinos en Cusco se presentan correlaciones moderadas positivas entre la CFF con la DDF ($r=0.45$; $p<0.01$) y HDF ($r=0.47$; $p<0.01$), y una correlación positiva fuerte con la PA ($r=0.54$; $p<0.01$). En la Figura 54 se observa que sobre los bosques naturales de la región Cusco existen correlaciones positivas moderadas entre la CFF y los parámetros climáticos PA ($r=0.31$; $p<0.01$), DDF ($r=0.48$; $p<0.01$) y HDF ($r=0.31$; $p<0.01$). En esta región la campaña agrícola de siembra se intensifica entre setiembre y diciembre (<https://www.minagri.gob.pe/portal/21-sector-agrario/agricola/>), lo que se asociaría al incremento de las actividades de quemas agrícolas incluso desde el mes de julio (Farfán y Hurtado; Manta, 2017; SERFOR, 2018) y con ello el desarrollo de los incendios forestales que se presentan con un incremento regular desde julio hasta noviembre sobre las vegetaciones estudiadas. Esto podría responder al por qué se alcanzan correlaciones positivas moderadas y fuertes con los parámetros climáticos en evaluación. Asimismo, se observan correlaciones débiles y nulas ($-0.3 < r < 0.3$) entre la CFF y los diferentes índices espectrales en el periodo julio-noviembre, lo que se debería a que las condiciones vegetativas van decreciendo entre mayo y setiembre debido al desarrollo de la época seca, seguido de una recuperación entre octubre y diciembre por acción del inicio de la temporada de lluvias.



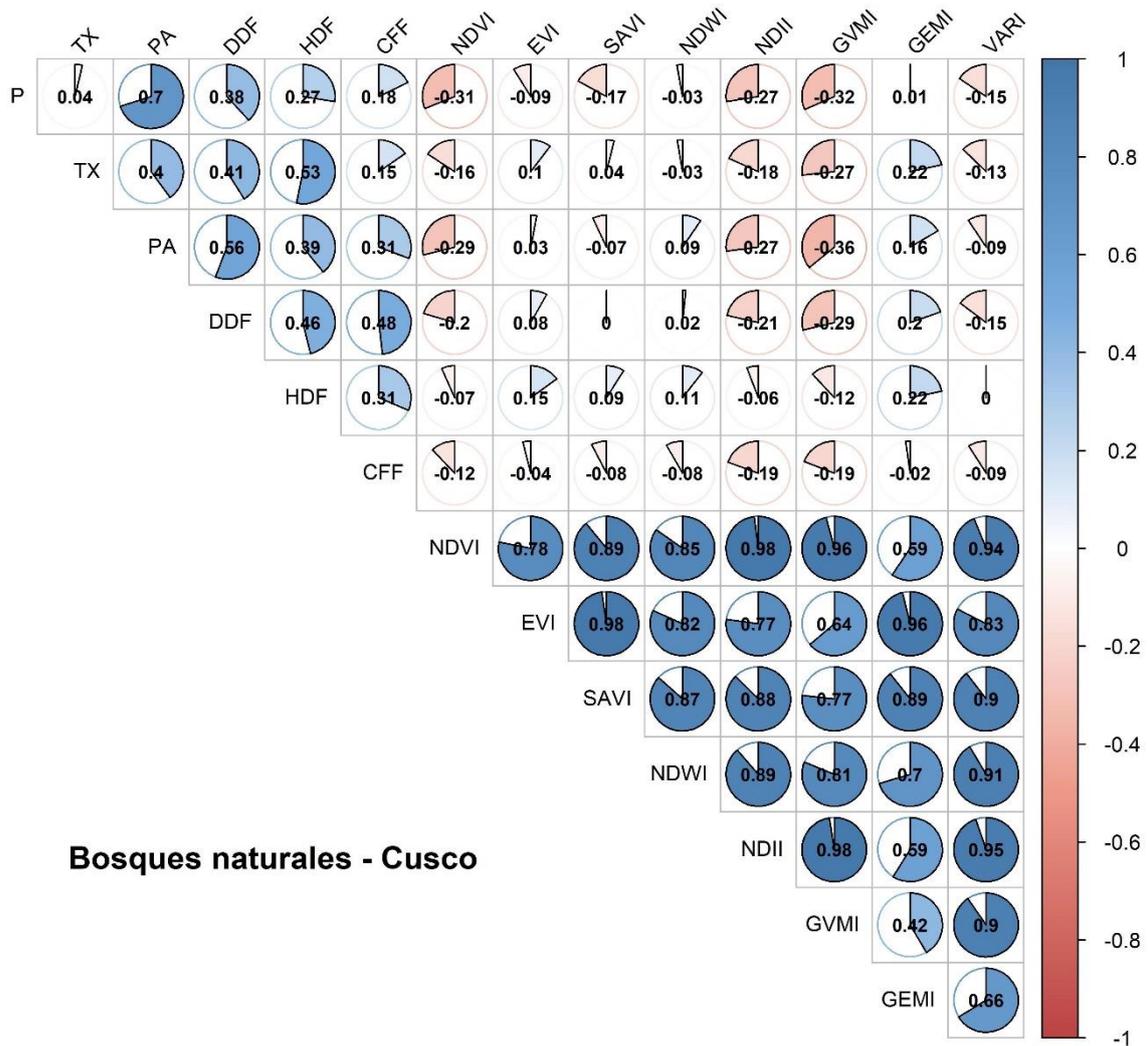
Pastizales andinos - Cusco

Figura 52: Matriz de correlaciones de frecuencia acumulada de incendios (CFF), variables climáticas: precipitación (P) y temperatura máxima (TX), parámetros climáticos: precipitación acumulada (PA), frecuencia de días secos (DDF) y frecuencia de días calurosos (HDF), y los índices espectrales (NDVI, EVI, SAVI, GEMI, NDWI, NDII, GVMI y VARI), obtenidos entre sí para el periodo agosto-noviembre para la vegetación de pastizales andinos en la región Cajamarca



Matorrales andinos - Cusco

Figura 53: Matriz de correlaciones de frecuencia acumulada de incendios (CFF), variables climáticas: precipitación (P) y temperatura máxima (TX), parámetros climáticos: precipitación acumulada (PA), frecuencia de días secos (DDF) y frecuencia de días calurosos (HDF), y los índices espectrales (NDVI, EVI, SAVI, GEMI, NDWI, NDII, GVMI y VARI), obtenidos entre sí para el periodo agosto-noviembre para la vegetación de matorrales andinos en la región Cajamarca

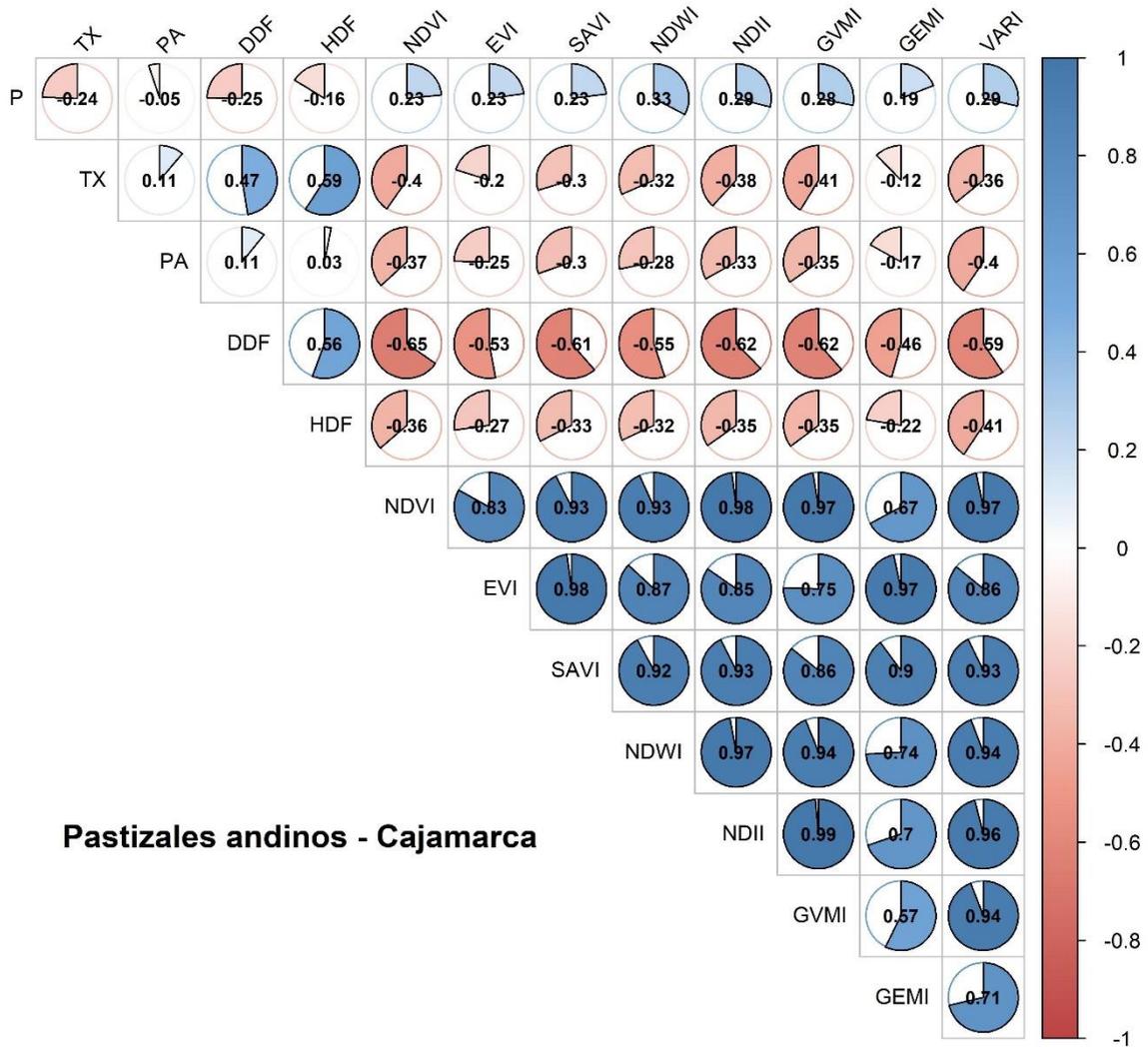


Bosques naturales - Cusco

Figura 54: Matriz de correlaciones de frecuencia acumulada de incendios (CFF), variables climáticas: precipitación (P) y temperatura máxima (TX), parámetros climáticos: precipitación acumulada (PA), frecuencia de días secos (DDF) y frecuencia de días calurosos (HDF), y los índices espectrales (NDVI, EVI, SAVI, GEMI, NDWI, NDII, GVMI y VARI), obtenidos entre sí para el periodo agosto-noviembre para la vegetación de bosques naturales en la región Cajamarca

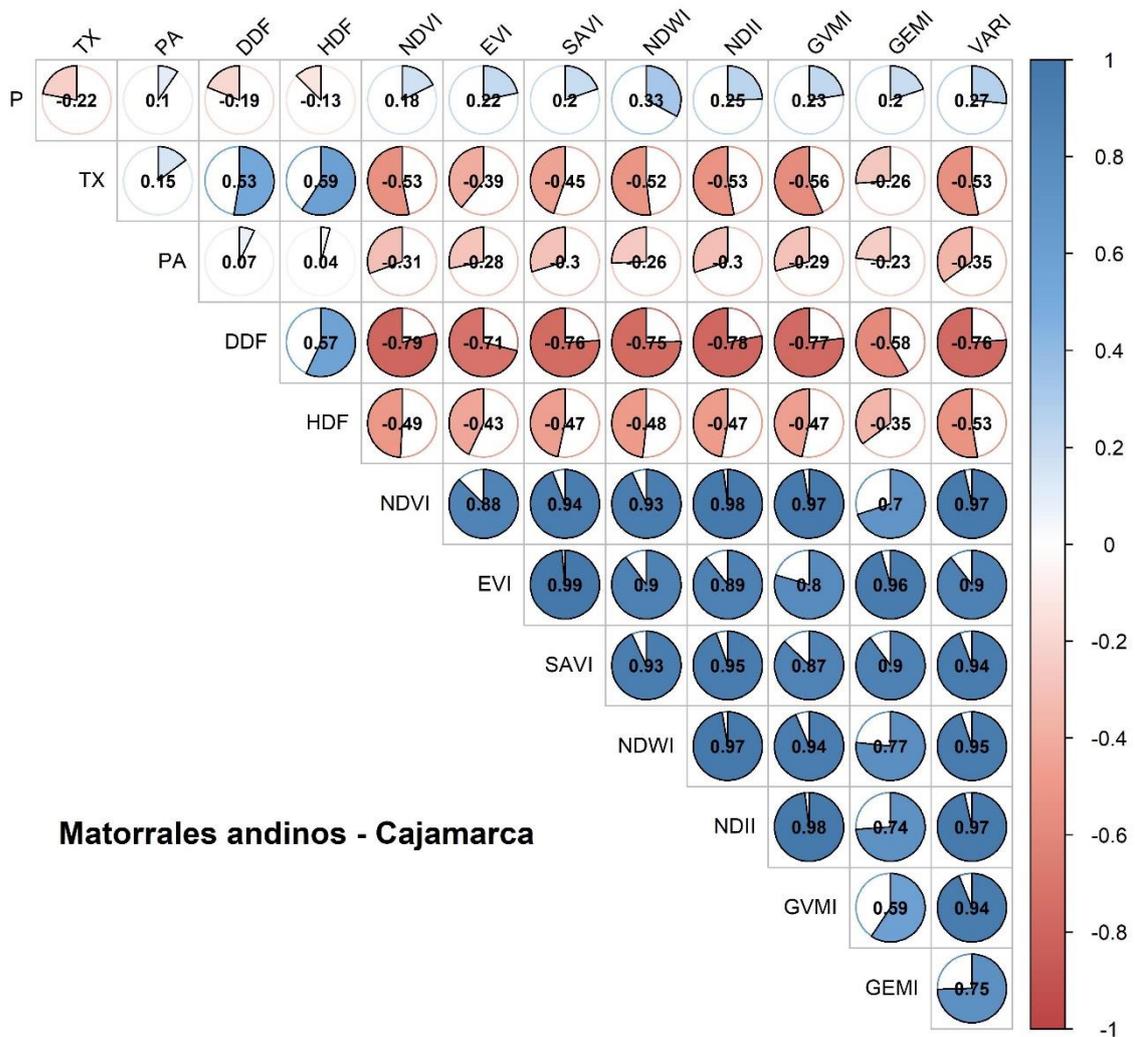
Es claro que para el periodo en que se desarrollan los incendios forestales en Cajamarca (agosto-noviembre) y Cusco (julio-noviembre) no se encuentran correlaciones significativas entre la CFF y los índices espectrales sobre los pastizales andinos, matorrales andinos y bosques naturales. El desarrollo de los índices espectrales, los cuales decrecen aproximadamente hasta el mes de setiembre (por ejemplo, el NDVI en la Figura 36) debido al término de la temporada de estiaje, seguido de una recuperación a medida en que se va desarrollando la temporada de lluvias, lo que podría explicar los bajos valores de correlación alcanzados durante esta etapa del año. En función a lo que se ha descrito en este estudio, algunos parámetros climáticos podrían caracterizar mejor las condiciones vegetativas durante periodos de déficit de humedad, por lo que se ha decidido construir una matriz de correlación de tipo Pearson para la época seca (mayo-setiembre) entre la P, TX, PA, DDF, HDF, NDVI, EVI, SAVI, GEMI, NDWI, NDII, GVMÍ y VARI (no se considera la CFF) con el objetivo de identificar qué índices espectrales responden mejor a los cambios de humedad y las altas temperaturas que se presentan durante los meses de estiaje sobre las vegetaciones analizadas, a fin de determinar las condiciones vegetativas que se alcanzan antes del incremento de los incendios forestales.

En la Figura 55 corresponde a la matriz de correlación para los pastizales andinos de Cajamarca. Se encontró correlaciones negativas fuertes entre la DFF y los índices espectrales NDVI, EVI, SAVI, NDWI, NDII, GVMÍ y VARI ($r < -0.5$; $p < 0.01$), mientras que la PA y la HDF alcanzaron correlaciones negativas moderadas más altas con el VARI ($r = -0.4$ y -0.41 , respectivamente; $p < 0.01$). Asimismo, la Figura 56 indica que sobre los matorrales andinos de Cajamarca también se logran correlaciones negativas fuertes entre la DFF y los índices NDVI, EVI, SAVI, GEMI, NDWI, NDII, GVMÍ y VARI ($r < -0.7$; $p < 0.01$). Además, el VARI alcanza una correlación negativa fuerte con la HDF ($r = -0.53$; $p < 0.01$) y una correlación negativa moderada con la PA ($r = -0.35$). La Figura 57 muestra que, sobre los bosques naturales de Cajamarca, las condiciones vegetativas expresados mediante los índices NDVI, SAVI, GEMI, NDWI, NDII, GVMÍ y VARI tiene respuestas significativas ante el desarrollo de la DDF ($r > -0.65$). De igual modo, se encontró correlaciones negativas moderadas mas altas entre el índice VARI con la PA ($r = -0.47$) y HDF ($r = -0.35$).



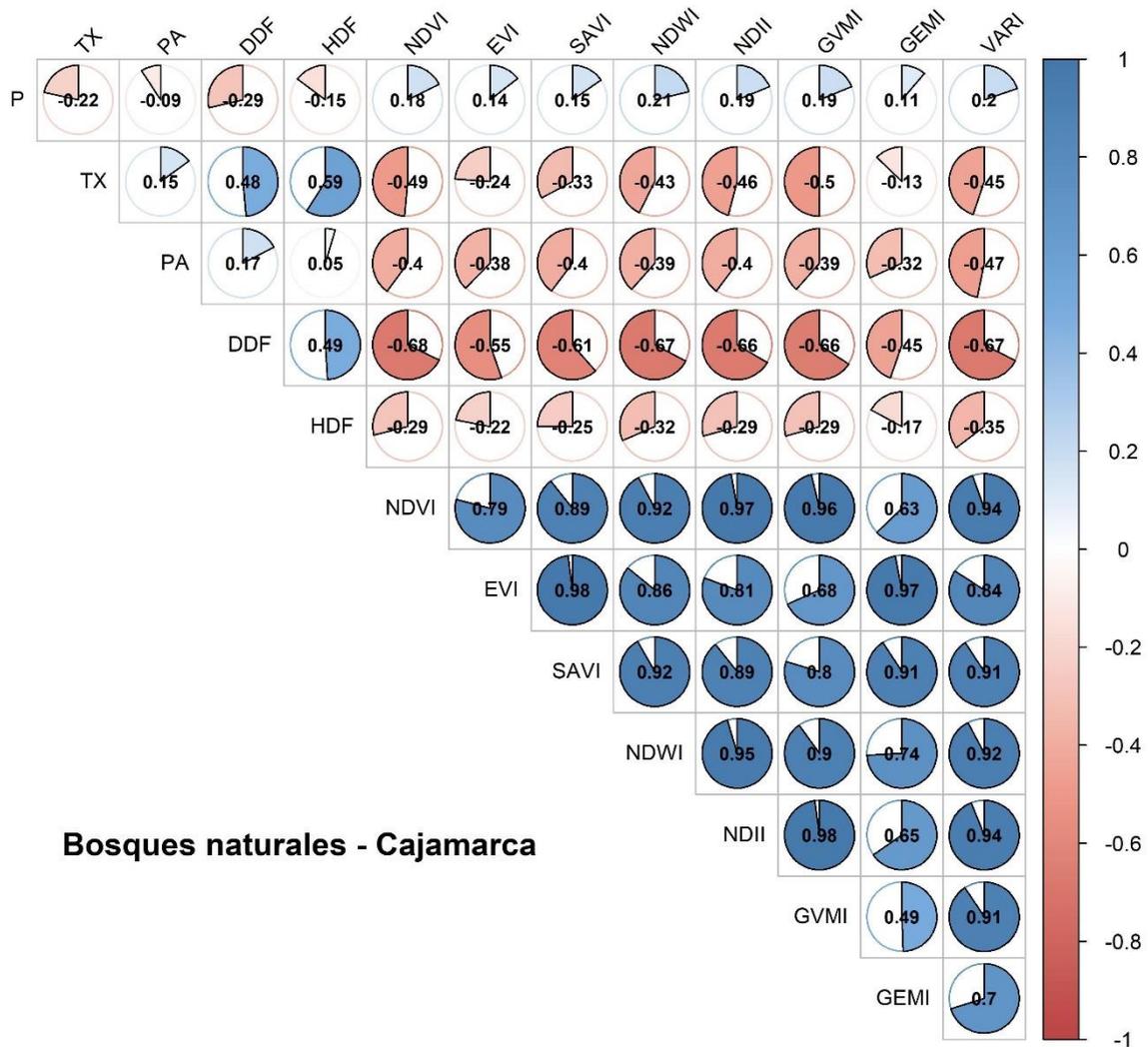
Pastizales andinos - Cajamarca

Figura 55: Matriz de correlaciones de variables climáticas: precipitación (P) y temperatura máxima (TX), parámetros climáticos: precipitación acumulada (PA), frecuencia de días secos (DDF) y frecuencia de días calurosos (HDF), y los índices espectrales (NDVI, EVI, SAVI, GEMI, NDWI, NDII, GVMI y VARI), obtenidos entre sí para el periodo mayo-setiembre para la vegetación de pastizales andinos en la región Cajamarca



Matorrales andinos - Cajamarca

Figura 56: Matriz de correlaciones de variables climáticas: precipitación (P) y temperatura máxima (TX), parámetros climáticos: precipitación acumulada (PA), frecuencia de días secos (DDF) y frecuencia de días calurosos (HDF), y los índices espectrales (NDVI, EVI, SAVI, GEMI, NDWI, NDII, GVMI y VARI), obtenidos entre sí para el periodo mayo-setiembre para la vegetación de matorrales andinos en la región Cajamarca



Bosques naturales - Cajamarca

Figura 57: Matriz de correlaciones de variables climáticas: precipitación (P) y temperatura máxima (TX), parámetros climáticos: precipitación acumulada (PA), frecuencia de días secos (DDF) y frecuencia de días calurosos (HDF), y los índices espectrales (NDVI, EVI, SAVI, GEMI, NDWI, NDII, GVMI y VARI), obtenidos entre sí para el periodo mayo-setiembre para la vegetación de bosques naturales en la región Cajamarca

La Figura 58 corresponde a la matriz de correlación respecto a los pastizales andinos de Cusco. Es claro que las condiciones vegetativas expresadas mediante los índices espectrales NDVI, EVI, SAVI, GEMI, NDWI, NDII, GVMI y VARI tienen respuestas negativas significativas ante la evolución de la DDF ($r < -0.60$; $p < 0.01$). Asimismo, el índice GVMI alcanza una correlación negativa más fuerte con la PA ($r = -0.60$; $p < 0.01$), DDF ($r = -0.69$; $p < 0.01$) y una correlación negativa moderada de -0.43 con la HDF. Respecto a los matorrales andinos en la región Cusco (Figura 59), se encuentran correlaciones negativas ligeramente más importantes entre los parámetros climáticos con el GVMI, respecto a los demás índices espectrales, siendo estos de -0.56 ($p < 0.01$) con la PA, -0.63 ($p < 0.01$) con la DDF y -0.44 ($p < 0.01$) con la HDF.

Por otro lado, la Figura 60 muestra las correlaciones existentes en los bosques naturales de Cusco. Es claro que el índice espectral GVMI representa mejor la relación entre el estado de la vegetación y las condiciones de humedad entre mayo y setiembre, al encontrarse correlaciones negativas fuertes con la PA ($r = -0.50$; $p < 0.01$) y con la DDF ($r = -0.52$; $p < 0.01$).

Las fuertes correlaciones negativas encontradas entre los índices espectrales y la frecuencia de días secos son coherentes con el estudio de Espinoza et al. (2016), donde se menciona que la vegetación en regiones de la parte occidental de la cuenca andina-amazónica es muy sensible a las concentraciones de lluvia durante la temporada de estiaje, lo que hace a este parámetro climático más adecuado para el monitoreo de las condiciones vegetativas en regiones andinas como Cajamarca y Cusco, además de inferir impactos de las sequías sobre la vegetación y posibles incrementos de los incendios forestales. Estos resultados sugieren que los índices espectrales más adecuados para realizar el seguimiento de la vegetación de los pastizales andinos, matorrales andinos y bosques naturales, como condicionantes a la ocurrencia de incendios forestales, ante los niveles de humedad y la frecuencia de días calurosos que se registran durante la temporada de estiaje, serían el VARI en Cajamarca y el GVMI en Cusco, fundamentalmente durante eventos de sequías como los registrados en el 2005, 2010 y 2016 en la cuenca andina-amazónica (Marengo et al., 2008; Espinoza et al., 2011; Jimenez et al., 2019), que fueron acompañados de incrementos severos de incendios forestales (Nobre et al., 2016; Brando et al., 2014; Zubieta et al., 2019)

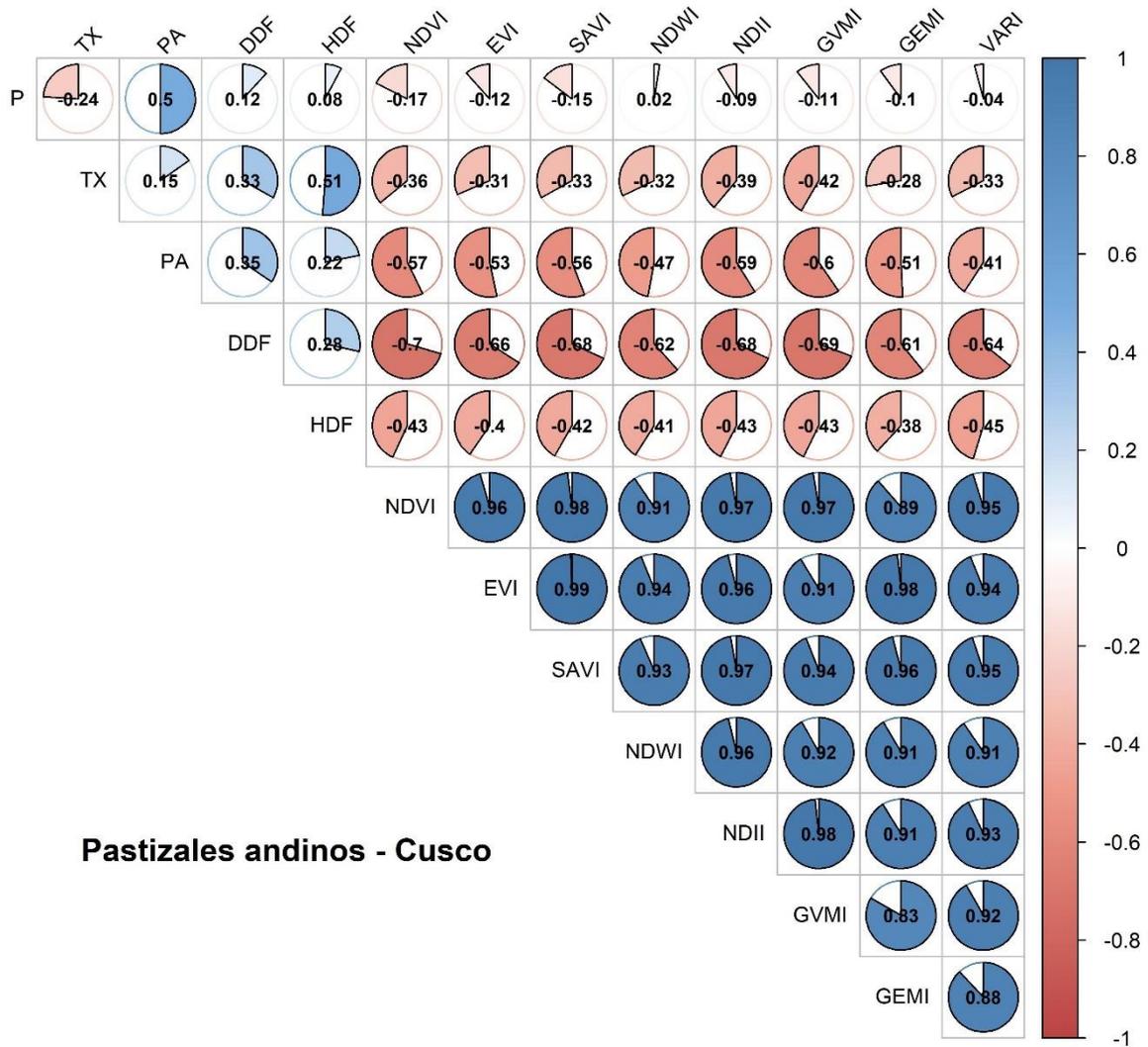
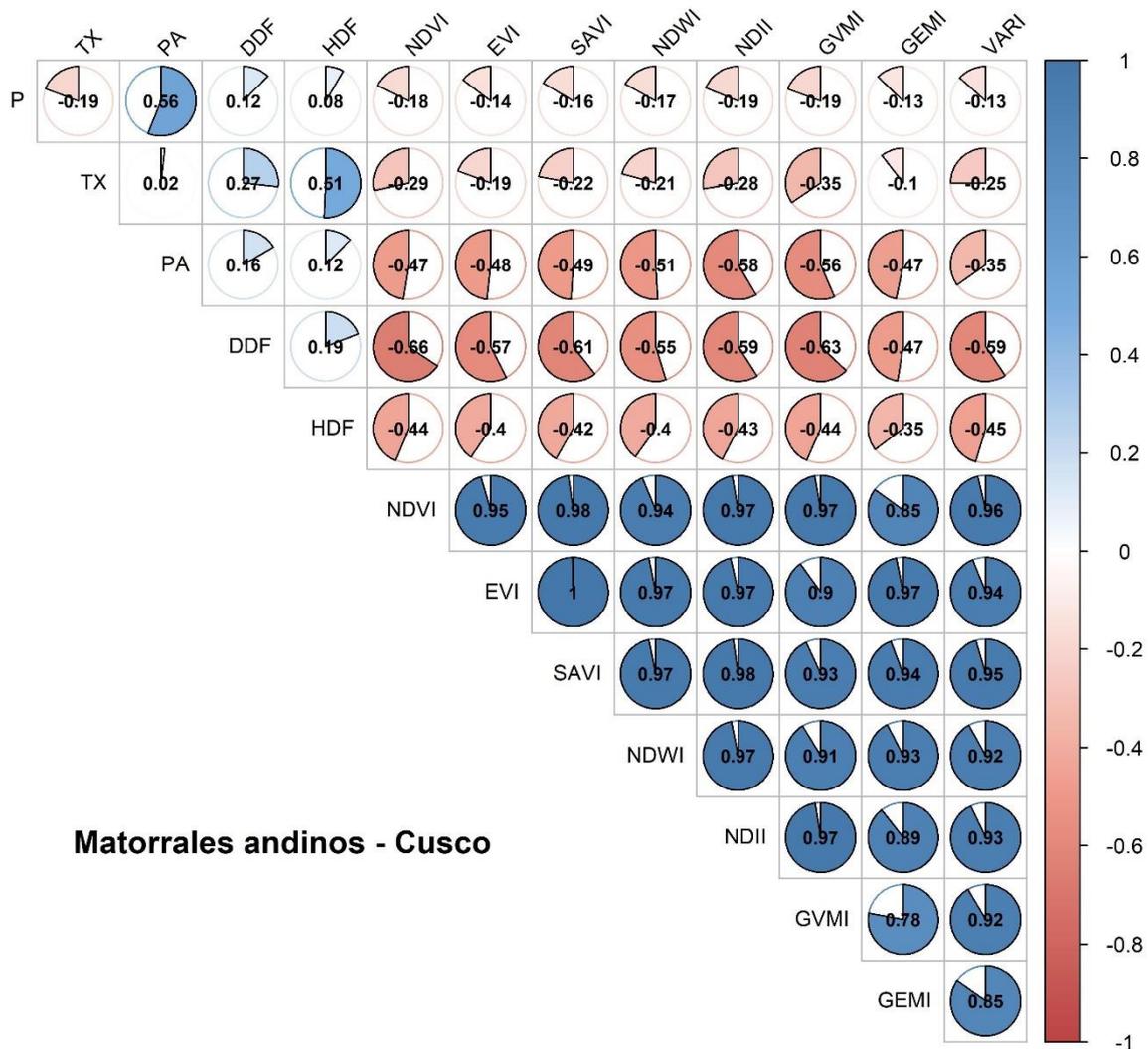


Figura 58: Matriz de correlaciones de variables climáticas: precipitación (P) y temperatura máxima (TX), parámetros climáticos: precipitación acumulada (PA), frecuencia de días secos (DDF) y frecuencia de días calurosos (HDF), y los índices espectrales (NDVI, EVI, SAVI, GEMI, NDWI, NDII, GVMI y VARI), obtenidos entre sí para el periodo mayo-setiembre para la vegetación de pastizales andinos en la región Cusco



Matorrales andinos - Cusco

Figura 59: Matriz de correlaciones de variables climáticas: precipitación (P) y temperatura máxima (TX), parámetros climáticos: precipitación acumulada (PA), frecuencia de días secos (DDF) y frecuencia de días calurosos (HDF), y los índices espectrales (NDVI, EVI, SAVI, GEMI, NDWI, NDII, GVMI y VARI), obtenidos entre sí para el periodo mayo-setiembre para la vegetación de matorrales andinos en la región Cusco

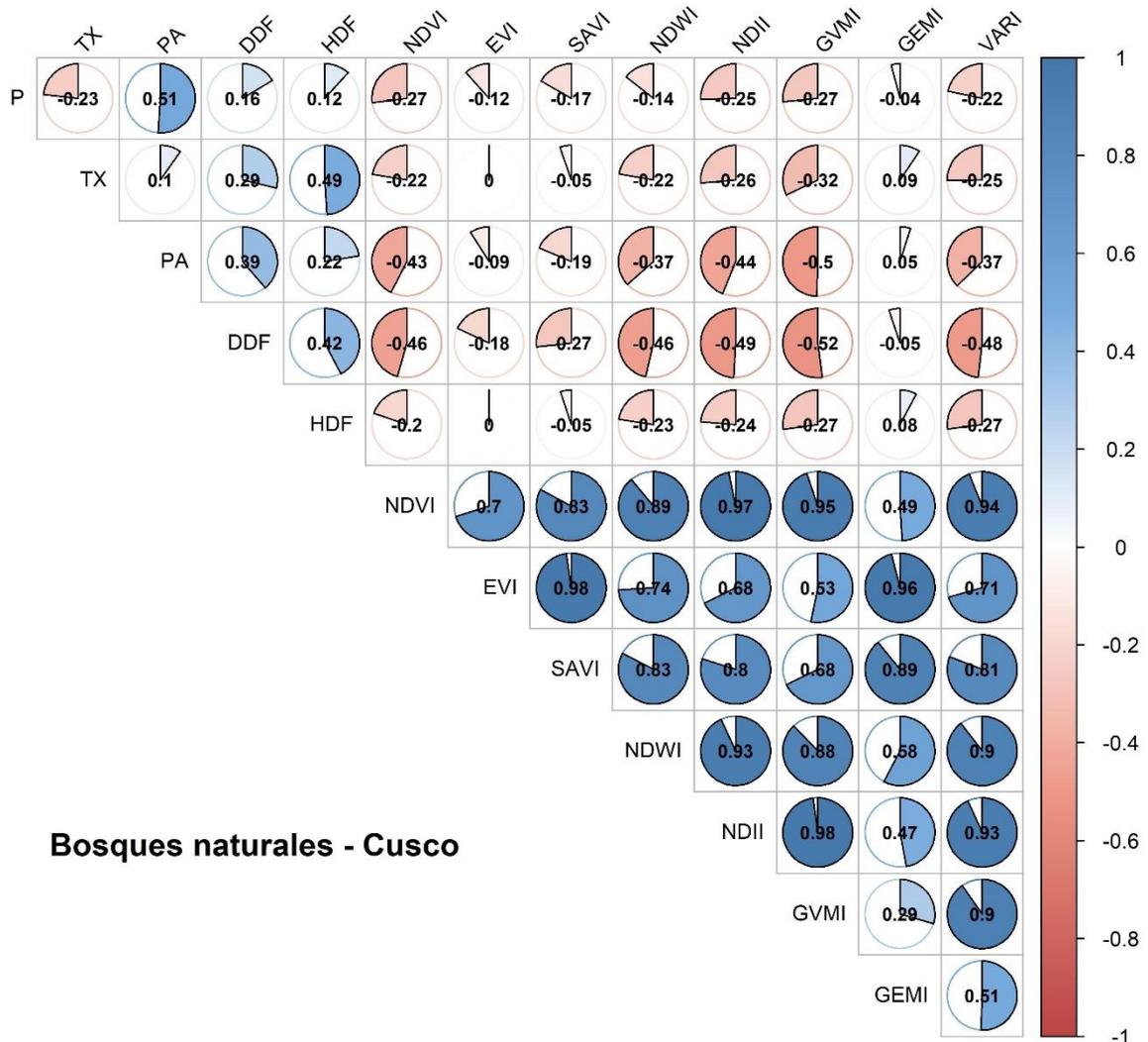


Figura 60: Matriz de correlaciones de variables climáticas: precipitación (P) y temperatura máxima (TX), parámetros climáticos: precipitación acumulada (PA), frecuencia de días secos (DDF) y frecuencia de días calurosos (HDF), y los índices espectrales (NDVI, EVI, SAVI, GEMI, NDWI, NDII, GVMI y VARI), obtenidos entre sí para el periodo mayo-setiembre para la vegetación de bosques naturales en la región Cusco

4.15 Comportamiento estacional de los índices de vegetación y frecuencia de incendios forestales

Con la finalidad de cuantificar las condiciones vegetativas favorables al incremento de la frecuencia de incendios forestales en las regiones andinas estudiadas, se ha analizado la estacionalidad de la evolución del estado de la vegetación en años con ocurrencia promedio y años con alta ocurrencia de incendios forestales sobre los pastizales andinos, matorrales

andinos y bosques naturales en la región Cajamarca (2005 y 2016) y la región Cusco (2005 y 2010). Con base en los resultados descritos en el capítulo anterior, las condiciones vegetativas fueron caracterizadas mediante el índice de resistencia atmosféricamente visible (VARI) para las coberturas en Cajamarca y el índice global de humedad de la vegetación (GVMI) para las vegetaciones en Cusco, debido a que son los índices espectrales que alcanzan las correlaciones más significativas con los parámetros climáticos precipitación acumulada, frecuencia de días secos y frecuencia de días calurosos. Es claro que sobre los pastizales andinos, matorrales andinos y bosques naturales en Cajamarca (Figura 61a, b y c, respectivamente) las condiciones vegetativas durante los años con alta ocurrencia de incendios forestales tuvieron una tendencia a estar por debajo de lo registrado durante los años con ocurrencia promedio, presentando a inicios de agosto (tiempo en que el que se presenta el incremento de estos eventos) un valor para el VARI de -0.068 y 0.023, respectivamente para los pastizales andinos, de -0.104 y -0.054, respectivamente para los matorrales andinos, y -0.001 y 0.059, respectivamente para los bosques naturales. Asimismo, se evidencia que el incremento de incendios forestales durante los años con alta ocurrencia fue alrededor del 500% sobre los pastizales andinos, 400% sobre los matorrales andinos, y 200% sobre los bosques naturales, de lo registrado en años con ocurrencia promedio, incremento que se presenta principalmente durante noviembre, con diferencias notablemente mayores del índice VARI de hasta 0.099 para los pastizales andinos, 0.075 para los matorrales andinos y 0.109 para los bosques naturales. De igual forma, sobre los pastizales andinos, matorrales andinos y bosques naturales (Figura 61d, e y f) en Cusco, el GVMI durante los años con alta ocurrencia tuvo una tendencia a estar por debajo de las condiciones desarrolladas en los años con ocurrencia promedio, presentando a finales de julio, tiempo en que el número de incendios forestales registrados ya se empieza a diferenciar, aproximadamente valores de 0.108 y 0.122, respectivamente sobre los pastizales andinos, 0.082 y 0.093, respectivamente sobre los matorrales andinos y 0.276 y 0.296, respectivamente sobre los bosques naturales. La evolución de los incendios forestales en Cusco presenta un desarrollo más constante durante toda la temporada (julio-noviembre), siendo lo registrado en años con alta ocurrencia alrededor del 400% más que lo registrado en años con ocurrencia promedio en pastizales andinos, 150% en matorrales andinos, y 500% en bosques naturales.

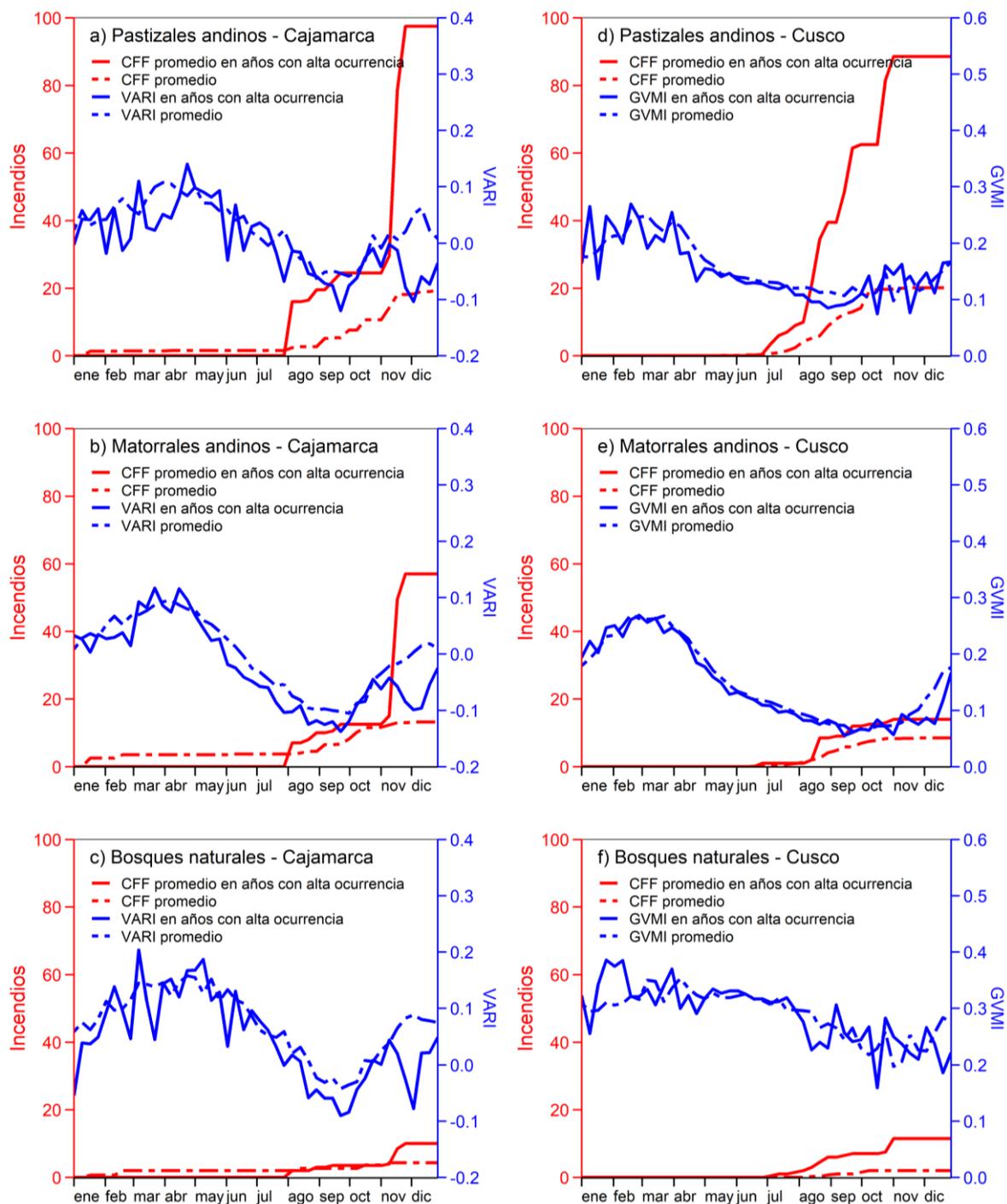


Figura 61: Frecuencia acumulada de incendios forestales (CFF) y el índice espectral VARI (Cajamarca) y GVM (Cusco), para periodos con ocurrencia promedio y de alta ocurrencia sobre pastizales andinos, matorrales andinos y bosques naturales en Cajamarca (a,b y c, respectivamente) y Cusco (d,e y f, respectivamente)

Con base en los resultados mostrados en este estudio, se proponen umbrales para los parámetros climáticos PA, DDF y HDF e índices espectrales VARI (Cajamarca) y GVMÍ (Cusco), con el fin de establecer las condiciones climáticas y vegetativas favorables al desarrollo de los incendios forestales a partir del mes de julio, durante años con ocurrencia promedio y años con alta ocurrencia, incrementos que coincidieron con las sequías registradas durante el 2005, 2010 y 2016 en la cuenca andina-amazónica (Marengo et al., 2008; Espinoza et al., 2011; Jimenez et al., 2019). Los umbrales definidos, monitoreados desde el inicio de la temporada de estiaje (mayo), para los pastizales andinos, matorrales andinos y bosques naturales de Cajamarca y Cusco se presentan en la Tabla 16 y Tabla 17, respectivamente.

Tabla 16: Umbrales de PA, DDF, HDF y VARI identificados para el inicio de la temporada de incendios forestales sobre los pastizales andinos, matorrales andinos y bosques naturales en Cajamarca

Región	Vegetación	Periodo	PA	DDF	HDF	VARI
Cajamarca	Pastizales andinos	Ocurrencia promedio	65	4	17	0.023
		Alta ocurrencia	28	14	20	-0.068
	Matorrales andinos	Ocurrencia promedio	31	3	16	-0.054
		Alta ocurrencia	9	16	22	-0.104
	Bosques naturales	Ocurrencia promedio	103	6	16	0.059
		Alta ocurrencia	48	16	23	-0.001

Tabla 17: Umbrales de PA, DDF, HDF y GVMÍ identificados para el inicio de la temporada de incendios forestales sobre los pastizales andinos, matorrales andinos y bosques naturales en Cusco

Región	Vegetación	Periodo	PA	DDF	HDF	GVMÍ
Cusco	Pastizales andinos	Ocurrencia promedio	90	8	9	0.122
		Alta ocurrencia	45	19	29	0.108
	Matorrales andinos	Ocurrencia promedio	67	7	7	0.093
		Alta ocurrencia	31	17	28	0.082
	Bosques naturales	Ocurrencia promedio	85	8	10	0.296
		Alta ocurrencia	45	18	27	0.276

V. CONCLUSIONES

1. De la evaluación espacial y temporal del registro histórico de incendios forestales de la DGOTA-MINAM entre el 2002 y 2016, se ha encontrado que las regiones más afectadas por estos eventos son Cajamarca y Cusco, siguiendo un marcado comportamiento estacional que se desarrolla durante la segunda mitad del año. De esto, se ha identificado un incremento severo de incendios forestales durante el 2005 (~400%) y 2016 (~600%) respecto al promedio en años con ocurrencia normal en la región Cajamarca. Asimismo, en Cusco el aumento severo se registró en los años 2005 (~300%) y 2010 (~250%). Con base en esta evaluación, se priorizó el estudio sobre estos departamentos, cuya extensión territorial se encuentra predominantemente en los Andes.
2. Se ha identificado que los ecosistemas de alta montaña más afectados por los incendios forestales en Cajamarca y Cusco fueron los pastizales andinos, matorrales andinos y bosques naturales, los cuales ocurren, principalmente, en altitudes por encima de los 1500 msnm. El desarrollo de estos eventos sobre estas regiones podría verse favorecido por la intrincada topografía propia de los Andes, el cual se caracteriza por las fuertes pendientes que representan un riesgo potencial mayor para el desarrollo y la expansión del fuego. El gran número de incendios forestales registrados sobre los ecosistemas andinos descritos representan una de las principales amenazas sobre estos, debido al efecto directo que ejercen sobre los regímenes hidrológicos y la disponibilidad hídrica, tal como lo señalan diversos autores.
3. El análisis espacio-temporal de la precipitación y temperatura indica que, si bien Cajamarca y Cusco se encuentran ubicadas al norte y sur de los Andes peruanos, respectivamente, estas regiones cuentan con un comportamiento estacional de estas variables climáticas muy parecidas, donde la temporada de estiaje se desarrolla entre mayo-setiembre, el inicio de la temporada de lluvias entre octubre-diciembre y la temporada de lluvias propiamente dicha entre enero-abril, con menores niveles de precipitación y mayores temperaturas máximas registradas en Cajamarca a comparación de Cusco. Siguiendo estos patrones climáticos, la vegetación desarrolla sus mejores

condiciones (tamaño, humedad, vigorosidad, etc.) durante la temporada de lluvias, mientras que las condiciones más críticas se presentan en el periodo de estiaje. Todo esto es coherente con el desarrollo de los incendios forestales durante la segunda mitad del año en Cajamarca y Cusco, debido a que durante este tiempo las condiciones climáticas y vegetativas son las más óptimas para que el fuego, producto de las quemadas, principalmente agropecuarias, pueda desencadenarse con facilidad y se desarrolle sin control sobre los ecosistemas altoandinos, consecuente con lo indicado en otros estudios.

4. Se ha evidenciado que las sequías del 2005 y 2016, caracterizadas por el desarrollo de eventos el Niño en el Pacífico Central, tuvieron un impacto negativo sobre la precipitación y, consecuentemente, sobre las condiciones vegetativas de los pastizales andinos, matorrales andinos y bosques naturales en Cajamarca durante el periodo de estiaje, coincidiendo con el incremento severo de incendios forestales durante estos años. Asimismo, las sequías del 2005 y 2010, que coincidieron con el aumento de la temperatura superficial del mar en el Atlántico Norte, alcanzaron mayor repercusión sobre las lluvias y el estado de la vegetación de los ecosistemas altoandinos evaluados durante la temporada seca en Cusco, concordando con los niveles extremos en el número de incendios forestales registrados en esta región. De lo descrito, se deduce que la disminución continua de la precipitación debido a condiciones de sequía y el posterior déficit de humedad en el suelo, causan un nivel de sequedad de la cobertura vegetal por debajo del promedio, es decir, un aumento del combustible forestal que hace posible la propagación del fuego con mayor facilidad y un posterior incremento extremo de los incendios forestales.
5. Se ha determinado que en los años con incremento severo de incendios forestales, tanto para Cajamarca como para Cusco, los niveles de precipitación se encontraron por debajo del promedio, mientras que la temperatura máxima promedio fue superior a la normal. No obstante, la asociación directa de la lluvia y temperatura máxima con el elevado número de eventos registrados no es tan clara, debido a que condiciones meteorológicas similares en época de estiaje, en promedio, se presentaron en otros años considerados como normales, por lo que fue importante evaluar temporalmente los parámetros climáticos como la precipitación acumulada (PA), frecuencia de días secos (DDF) y frecuencia de días calurosos (HDF).

6. Se ha identificado que durante los años en que coincidieron sequías extremas con incrementos severos de incendios forestales en Cajamarca (2005 y 2016) y Cusco (2005 y 2010), sobre las vegetaciones de pastizales andinos, matorrales andinos y bosques naturales, los parámetros climáticos PA, DDF y la HDF alcanzaron valores mayores al promedio entre mayo y diciembre. Estos resultados evidencian que el alto número de días con ausencia de precipitaciones de manera consecutiva y las lluvias acumuladas por debajo del promedio, sumados a la persistencia de días en que la temperatura máxima registrada presentó valores anómalos, guardan relación con el incremento severo de incendios forestales durante estos años, por lo que su monitoreo resulta importante al brindar información de las condiciones climáticas favorables al desencadenamiento de los incendios forestales.

7. Se evidencia que la frecuencia acumulada de incendios (CFF) alcanza correlaciones más significativas, en su mayoría, con los parámetros climáticos precipitación acumulada (PA), frecuencia de días secos (DDF) y frecuencia de días calurosos (HDF) sobre los pastizales andinos, matorrales andinos y bosques naturales en Cajamarca (entre agosto y noviembre) y Cusco (entre julio y noviembre), lo que nos sugiere un nivel de importancia para el monitoreo de las condiciones climáticas favorables al desencadenamiento de los incendios forestales y posibles incrementos severos durante años de sequía extrema. Adicionalmente, la evaluación de correlación durante la temporada de estiaje, indica que la caracterización de las condiciones vegetativas de los pastizales andinos, matorrales andinos y bosques naturales estaría mejor representado mediante el VARI en Cajamarca y GVMI en Cusco.

8. Con base en los resultados de umbrales de los parámetros climáticos e índices de vegetación establecidos por tipo de ecosistema y en el sentido de aportar a la planificación y toma de decisiones integradas para reducir los impactos de los incendios forestales en los Andes de Cajamarca y Cusco, se proponen las siguientes medidas, las cuales pueden ser considerados por las entidades competentes: i. Realizar el seguimiento de la evolución de la precipitación acumulada, frecuencia de días secos y frecuencia de días calurosos desde el inicio del periodo de estiaje, a fin de estimar posibles incrementos severos de siniestros durante años de sequía extrema debido a los bajos niveles de humedad que se pueden presentar en el aire, el suelo y la vegetación ante un persistente incremento de días sin lluvia y con altas temperaturas. ii. Llevar a cabo el monitoreo del estado de la

vegetación en Cajamarca mediante el índice espectral VARI, y en Cusco mediante el GVMI, con el fin de emitir una alerta ante posibles escenarios con alta ocurrencia de incendios forestales debido al aumento del combustible forestal (niveles de sequedad de la vegetación por debajo de lo normal), principalmente ante el desarrollo de sequías extremas. iii. Establecer una normativa que el que se puedan definir calendarios de quemas que indique los días y horarios que permitan generar fuegos controlados, siguiendo información de las condiciones climáticas y vegetativas que aumentan el riesgo potencial de incendios forestales, reportadas por instituciones como SENAMHI, IGP, SERFOR, etc.

VI. RECOMENDACIONES

Vincular este tipo de estudios sobre factores climáticos y vegetativos con los temas sociales, con el objetivo de reducir la incertidumbre acerca de las causas y los impactos de los incendios.

Esta investigación pueda aportar a la conformación de sistemas de alerta temprana que identifica condiciones favorables a la ocurrencia de incendios, el cual resulta importante para la gestión del territorio y los ecosistemas frágiles.

Se pueda fortalecer este trabajo estudiando los factores climáticos (Humedad relativa, dirección y velocidad del viento, etc.) y vegetativos en otras regiones con problemas similares de alta ocurrencia de incendios.

Actualmente existe una incertidumbre sobre la continuación de los datos grillados de precipitación y temperatura PISCO, por lo que se recomienda considerar otros datos climáticos espaciales como GPM-IMERG (lluvia) y ERA5 (temperatura), que proporcionan información actualizada a escala diaria y subdiaria, además de ser información de descarga libre, con los que se puedan continuar estudios de estas características.

Si bien las imágenes del sensor MODIS proporcionan información importante sobre la superficie terrestre, los satélites Terra y Aqua han sobrepasado el tiempo de vida útil considerada en su lanzamiento (6 años), por lo que se debe darle relevancia a considerar datos de sensores más recientes como los del OLI del satélite Landsat 8, MSI del satélite Sentinel 2, VIIRS y otros con diferentes tipos de resoluciones.

Los hallazgos de esta tesis pueden ser punto de partida para la formulación de un índice climático y vegetativo potencial para la ocurrencia de incendios sobre la cobertura vegetal de los Andes.

VII. BIBLIOGRAFÍA

Accostupa, M. (2017). Fenomeno El Niño y su relación con la variabilidad climática en la provincia de Cusco, periodo 1964 – 2014. Tesis para optar el grado de Doctor en Medio ambiente y desarrollo sostenible. Escuela de Posgrado. Universidad Andina del Cusco

Aceituno, P. (1988). On the functioning of the southern oscillation in the South American sector: surface, climate. *Mon. Weather Rev.* 116: 505–524.

Aguado, L. y Camila, A. (1998). Fundamentos y utilización de índices meteorológicos de peligro de incendio. *Serie Geográfica.* 7: 49-58

Aguilar, E., Auer, I., Brunet, M., Thomas C, P., y Wieringa, J. (2003). Guidelines on climate metadata and homogenization. Number 1186.

Aide, T. M., Grau, H. R., Graesser, J., Andrade-Nuñez, M. J., Aráoz, E., Barros, A. P., Campos-Cerqueira, M., Chacon-Moreno, E., Cuesta, F., Espinoza, R., Peralvo, M., Polk, M. H., Rueda, X., Sanchez, A., Young, K. R., Zarbá, L., y Zimmerer, K. S. (2019). Woody vegetation dynamics in the tropical and subtropical Andes from 2001 to 2014: Satellite image interpretation and expert validation. *Global Change Biology*, 25(6), 2112–2126. <https://doi.org/10.1111/gcb.14618>

Alcantará, G. (2009). Cobertura vegetal y uso actual departamento de Cajamarca. Gobierno Regional de Cajamarca.

Alcántara, G. (2012). Cobertura vegetal y uso actual departamento de Cajamarca. Gobierno regional de Cajamarca.

Alvares, M.Y., Santis, A. y Chuvieco, E. (2005). Estimación del peligro de incendios a partir de teledetección y variables meteorológicas: variación temporal del contenido de humedad del combustible. *Recursos Rurais.* 1(1), 9-19.

Alves, T. L. B., Azevedo, P. V. y Farias, A. A. (2015). Comportamento da precipitação pluvial e sua relação com o relevo nas microrregiões do Cariri Oriental e Ocidental do estado da Paraíba. *Revista Brasileira de Geografia Física*, 8(6), 1601-1614.

ANA (2010). Diagnóstico y plan de gestión de recursos hídricos en la cuenca Vilcanota Urubamba – Fase 1.

ANA-MINAM, 2012. Mapa de Humedales del Perú.

Angelidis, P., Maris, F., Kotsovinos, N., y Hrissanthou, V. (2012). Computation of Drought Index SPI with Alternative Distribution Functions. *Water Resources Management*, 26(9), 2453–2473. <https://doi.org/10.1007/s11269-012-0026-0>

Aragão, L. E. O., Malhi, Y., Barbier, N., Lima, A., Shimabukuro, Y., Anderson, L., y Saatchi, S. (2008). Interactions between rainfall, deforestation and fires during recent years in the Brazilian Amazonia. *Philosophical Transactions of the Royal Society of London B: Biological Sciences*, 363(1498), 1779-1785.

Aramayo, W. (2019). Distribución espacial del riesgo de sequía en la región Andina de Puno, Perú. Tesis para optar el grado de Magister Scientiae en Recursos Hídricos, Escuela de Posgrado, Universidad Nacional Agraria la Molina, Lima.

Arnaldos J., Navalón X., Pastor E., Planas E. y Zárata L. (2004). Manual de ingeniería básica para la prevención y extinción de incendios forestales. Barcelona, España: Fondo editorial Mundi Prensa.

Aucahuasi, A. (2019). Análisis de tendencias de precipitación y temperatura (1970-2017) en la ciudad de Puerto Maldonado, Perú. Perú. Tesis para optar el grado de Magister, Facultad de Ciencias Agrarias, Universidad Nacional San Antonio Abad del Cusco, Cusco.

Aybar, C., Fernández, C., Huerta, A., Lavado, W., Vega, F., y Felipe-Obando, O. (2020). Construction of a high-resolution gridded rainfall dataset for Peru from 1981 to the present day. *Hydrological Sciences Journal*, 65(5), 770–785. <https://doi.org/10.1080/02626667.2019.1649411>

Banco Central de Reserva del Perú (2018). Caracterización del departamento de Cusco. Departamento de estudios económicos, Sucursal Cusco.

Banco Central de Reserva del Perú (2018). Caracterización del departamento de Cajamarca. Departamento de estudios económicos, Sucursal Trujillo.

Bannari, A., Morin, D., Bonn, F., y Huete, A.R. (1995). A review of vegetation indices. *Remote sensing reviews* 13(1-2): 95-120.

BCRP (2018). Caracterización del departamento de Cajamarca.

BCRP (2018). Caracterización del departamento de Cusco.

Beguiría, S., Vicente-Serrano, S. M. y Martínez, A. (2010). A multiscalar global drought dataset: the SPEIbase – a new gridded product for the analysis of drought variability and impacts. *Bulletin of the American Meteorological Society* 91 (10), 1351–1356.

Bisquert, M., Sanchez, J., Caselles V., Paz, M. y Legido J. (2009). Los índices de vegetación como indicadores de riesgo de incendio en Galicia. *Teledetección: Agua y desarrollo sostenible. Aplicaciones con imágenes del sensor Terra-MODIS. XIII Congreso de la Asociación Española de Teledetección. Calatayud. 23-26 September 2009, 301-304.*

Blanco, L; Luna, E. y Sancho, A. (2018). Informe de anomalías del índice verde en las regiones ganaderas: llanos de la Rioja, arco noroeste – Sierras de Córdoba: período noviembre 2017 – febrero 2018. DOI: 10.13140/RG.2.2.28909.90081

Boisier, J. P., P. Ciais, A. Ducharne, y Guimberteau M. (2015). Projected strengthening of Amazonian dry season by constrained climate model simulations, *Nat. Clim. Change*, 5(7), 656–660.

Bravo, L. (2013). Tendencias temporales del índice mejorado de la vegetación (EVI) en cinco coberturas naturales del Occidente, Norte y Noroeste de Mexico durante el período 2000-2013. *Revista Teledetección*, Vol. 20, pp. 80-90

Brienen, R. J. W., Phillips, O. L., Feldpausch, T. R., Gloor, E., Baker, T. R., Lloyd, J., y Martínez, R. V. (2015). Long-term decline of the Amazon carbon sink. *Nature*, 519(7543), 344-348.

Caon, L., Vallejo, V. R., Ritsema, C. J., y Geissen, V. (2014). Effects of wildfire on soil nutrients in Mediterranean ecosystems. *Earth-Science Reviews*, 139, 47-58.

CDC-UNALM. (2006). Análisis del Recubrimiento Ecológico del Sistema Nacional de Áreas Naturales Protegidas por el Estado. Perú.

Ceccato, P., Gobron, N., Flasse, S., Pinty, B. y Tarantola, S., (2002). Designing a spectral index to estimate vegetation water content from remote sensing data: Part 1. Theoretical approach. *Remote Sensing of Environment*, 82, 188-197.

CENEPRED (2015). Escenario de riesgos ante la temporada de lluvias 2015 – 2016. Recuperado de [http://cenepred.gob.pe/download/dgp/ESCENARIO DE RIESGO TEMPORADA DE LLUVIAS 2015 - 2016.pdf](http://cenepred.gob.pe/download/dgp/ESCENARIO_DE_RIESGO_TEMPORADA_DE_LLUVIAS_2015_-_2016.pdf)

Chavez, S. P., y Takahashi, K. (2017). Orographic rainfall hot spots in the Andes-Amazon transition according to the TRMM precipitation radar and in situ data, *J. Geophys. Res. Atmos.*, 122, 5870–5882, doi:10.1002/2016JD026282

Chow, V., Maidment, D. y Mays, L. (1994). *Hidrología Aplicada*. McGraw – Hill Companies.

Chuvieco, E. (1995). *Fundamento de teledetección espacial*. Madrid, España. Ediciones Rialp S.A.

Chuvieco, E., Salas, F. J., Aguado, I., Cocero, D. y Riaño, D. (2001): Estimación del estado hídrico de la vegetación a partir de sensores de alta y baja resolución, *GeoFocus*, 1, 1-16

Cihlar, J. (2000) Land cover mapping from satellites: Status and research priorities. *International Journal of Remote Sensing*, 21, 1093–1114, 2000.

Cocero, D., Riaño, D. y Chuvieco, E. (1998): Estimación de la humedad de la vegetación usando imágenes de satélite e índices meteorológicos de peligro de incendios. Serie Geográfica, 7, 59-72.

Cruz, K. (2019). Mapeo y análisis de calidad física y química de los suelos agrícolas de la Universidad Nacional Agraria La Molina aplicando herramientas SIG. Tesis para optar el grado de Ingeniero Agrícola, Facultad de Ingeniería Agrícola, Universidad Nacional Agraria la Molina, Lima.

De la Cruz, J., Zorogastúa, P. y Hijmans, R. (1999). Atlas de los Recursos Naturales de Cajamarca. Lima, PE. CIP. 49 p.

Domínguez, J. (2000). Breve introducción a la Cartografía y a los Sistemas de Información Geográfica (en línea). Informes Técnicos Centro de Investigaciones Energéticas, Medioambientales y Tecnológicas (Ciemat) no 943. Consultado 10 jul. 2014. Disponible en http://www.iaea.org/inis/collection/NCLCollectionStore/_Public

Durante, M. (2016). Guía para la interpretación de los informes del estado de la vegetación de la provincia de Entre Ríos. INTA EEA Concepción del Uruguay.

El Comercio (2019). <https://elcomercio.pe/peru/incendios-forestales-destruyen-500-hectareas-cobertura-natural-6-regiones-noticia-nndc-670515-noticia/>

Erfanian, A., Wang, G. y Fomenko, L. (2017). Unprecedented drought over tropical South America in 2016: significantly under-predicted by tropical SST. Scientific Reports. 7(1) DOI: 10.1038/s41598-017-05373-2

Espinoza J.C., Segura H, Ronchail J, Drapeau G, Gutierrez O. (2016). Evolution of wet- and dry-day frequency in the western Amazon basin: Relationship with the atmospheric circulation and impacts on the vegetation. Water Resources Research. doi: 10.1002/2016WR019305.

Espinoza , J.C., Ronchail, J, Guyot, J.L, Cochonneau, G., Filizola, N.P., Lavado Casimiro, W,S., de Oliveira, E., Pombosa Loza, R., Vauchel, P. (2009). Spatio—Temporal rainfall

variability in the Amazon basin countries (Brazil, Peru, Bolivia, Colombia and Ecuador). *International Journal of Climatology* 29(11): 1574–1594

Espinoza, J. C., Ronchail, J., Guyot, J. L., Junquas, C., Vauchel, P., Lavado, W., Drapeau, G., y Pombosa, R. (2011). Climate variability and extreme drought in the upper Solimões River (western Amazon Basin): Understanding the exceptional 2010 drought. *Geophysical Research Letters*, 38(13), 1–6. <https://doi.org/10.1029/2011GL047862>

Estévez, R. (2018). 5 lenguajes de programación imprescindibles. Obtenido de Geomapik: <http://www.geomapik.com/desarrollo-programacion-gis/5-lenguajes-programacion-gis-imprescindibles/>

FAO (2005). *Global Forest Resources Assessment 2005. Thematic report on forest fires in the South American Region. Forest Fire Management Working Papers: 5/E*. 38p. Consultora María Isabel Manta Nolasco.

Federal Emergency Management Agency. (1995). *National Mitigation Strategy: Partnerships for Building Safer Communities*. FEMA Mitigation Directorate. 40p.

Felicísimo, A. y García-Manteca, P. (1990): Corrección del efecto topográfico en las imágenes Landsat mediante el uso de un modelo digital de elevaciones. III Reunión Científica del Grupo de Trabajo en Teledetección: 209-216. Madrid, 1989.

Fernandez, B. (1997). Identificación y caracterización de sequías hidrológicas en Chile Central. *Ingeniería del agua*, 4 (4), 37-38.

Figueroa, S. y Nobre, C.A. (1990). Precipitation distribution over central and western tropical South America. *Climanalse*, 6: 36-40.

Fu, R., Zhu, B. y Dickinson, R. (1999). How the atmosphere and land surface influence seasonal changes of convection in the tropical Amazon? *Journal of Climate*, 12: 1306-1321.

Gaitan, J., Bran, D., Oliva, G., Ciari, G., Nakamatsu, V., Salomone, J., Ferrante, D., Buono, G., Massara V., Humano, G., Celdran, D., Opazo, W. y Maestre, F. (2013). Evaluating the performance of multiple remote sensing indices to predict the spatial

variability of ecosystem structure and functioning in Patagonian steppes, *Ecological Indicators*, 34, 181-191. <https://doi.org/10.1016/j.ecolind.2013.05.007>

Gao, B. (1996). NDWI-A normalized difference water index for remote sensing of vegetation liquid water from space. *R. S. of Environment*, 58, 257-66.

García-Haro, FJ., Campos-Taberner, M., Sabater, N., Belda, F., Moreno, A., Gilabert, MA; Martínez, B; Pérez-Hoyos, A; Meliá, J. (2014). Vulnerabilidad de la vegetación a la sequía en España. *Revista de Teledeteccion* (42):29-37. Vulnerabilidad de la vegetación a la sequía en España.

García-Orenes, F., Arcenegui, V., Chrenková, K., Mataix-Solera, J., Moltó, J., Jara- Navarro, A. B., y Torres, M. P. (2017). Effects of salvage logging on soil properties and vegetation recovery in a fire-affected Mediterranean forest: A two year monitoring research. *Science of The Total Environment*. doi: 10.1016/j.scitotenv.2017.02.090

Garreaud, R.D. (2000). Cold air incursions over Subtropical South America: Mean structure and dynamics. *Monthly Weather Review*, 128: 2544-2559.

Garreaud, R.D., Vuille, M., Compagnucci, R. y Marengo, J. (2009). Present-day South American climate. *Palaeogeography, Palaeoclimatology, Palaeoecology*. doi:10.1016/j.palaeo.2007.10.032

Garreaud, R.D. (2009). The Andes climate and weather. *Advances in Geosciences*, 22, 3–11

Giráldez, L., R., Silva, Y., Zubieta, R., y Sulca, J. (2020). Cambios en la estacionalidad de las lluvias en los Andes centrales peruanos y su relación con la circulación atmosférica a gran escala. *Boletín científico El Niño, Instituto Geofísico del Perú*, Vol. 7 N° 01, pag. 4-12

Gobierno Regional Cajamarca (2011). Estudio hidrológico de la región Cajamarca. Gerencia regional de planeamiento, presupuesto y acondicionamiento territorial.

Gobierno Regional Cusco (2005). Zonificación ecológica económica departamento del Cusco. Dirección de estudios y proyectos de gestión ambiental.

Gómez Delgado, M.; Barredo Cano, J.I. 2006. Sistemas de Información Geográfica y evaluación multicriterio en la ordenación del territorio. Alfaomega-Rama. México

Gomez, M. y Barredo, J. (2006). Sistemas de Información Geográfica y evaluación multicriterio en la ordenación del territorio. Editorial Afaomega. México. 243p.

Gonzales, P (2017). Impactos de los incendios forestales en suelo, agua, vegetación y fauna. Biblioteca del Congreso Nacional de Chile. Departamento de estudios, extensión y publicaciones. Recuperado de <https://www.camara.cl/pdf.aspx>.

Gonzaca, C. (2014). Aplicación de Índices de Vegetación Derivados de Imágenes Satelitales Landsat 7 ETM+ y ASTER para la Caracterización de la Cobertura Vegetal en la Zona Centro de la Provincia De Loja, Ecuador. Tesis para optar el grado de Magister, Facultad de Ingeniería, Universidad Nacional de La Plata, La Plata.

Gonzales, P. (2017). Impacto de los incendios forestales en suelo, agua, vegetación y fauna. Extensión y Publicaciones de la Cámara de Diputados. (24 de abril de 2017). Asesoría Técnica Parlamentaria.

Gu, Y., Brown, J. F., Verdin, J. P., y Wardlow, B. (2007). A five-year analysis of MODIS NDVI and NDWI for grassland drought assessment over the central Great Plains of the United States. *Geophysical Research Letters*, 34(6), 1–6. <https://doi.org/10.1029/2006GL029127>

Guimberteau, M., J. Ronchail, J. C. Espinoza, M. Lengaigne, B. Sultan, J. Polcher, G. Drapeau, J. L. Guyot, A. Ducharne, y P. Cialis. (2013). Future changes in precipitation and impacts on extreme stream-flow over Amazonian sub-basins, *Environ. Res. Lett.*, 8, 014035, doi: 10.1088/1748-9326/8/1/014035.

Gutierrez O. (2018). Estimación de Índices de Sequía Mediante Sensoramiento Remoto Integrando MODIS y TRMM en la Cuenca Andino - Amazónica, Perú, Tesis para optar el grado de Magister Scientiae en Recursos Hídricos, Escuela de Posgrado, Universidad Nacional Agraria la Molina, Lima.

Guttman, N. B. (1999). Accepting the standardized precipitation index: A calculation algorithm. *Journal of the American Water Resources Association*, 35(2), 311–322. <https://doi.org/10.1111/j.1752-1688.1999.tb03592.x>

Hayes, M. J., Svoboda, M. D., Wilhite, D. A., y Vanyarkho, O. V. (1999). Monitoring the 1996 drought using the standardized precipitation index. *Bulletin of the American Meteorological Society*, 80, 429-438.

Horel, J.D., Hahmann, A.N. y Geisler, J.E. (1989). An investigation of the annual cycle of convective activity over the tropical Americas. *Journal of Climate*, 2: 1388-1403

Huerta, A., Aybar, C., Lavado y Casimiro, W. (2018) PISCO temperatura v.1.1. SENAMHI - DHI-2018, Lima-Perú.

Huete, A. (1988). A Soil Adjusted Vegetation Index. *Remote Sensing of Environment*. 25, 295-309

Huete, A., Didan, K., Miura, T., Rodriguez, E.P., Gao, X., y Ferreira, L.G. (2002). Overview of the radiometric and biophysical performance of the MODIS vegetation indices. *Remote Sensing of Environment*, 83, 195-213.

Hunt, E.R., y Rock, B.N. (1989). Detection of changes in leaf water-content using N-IR y middleinfrared reflectances. *R. S. of Environ.* 30, 43-54.

Hunziker, S. Brönnimann, S. Calle, J. Moreno, I. Andrade, M. Ticona, L. Huerta, A. Lavado-Casimiro, W. (2018). Effects of undetected data quality issues on climatological analyses. *Clim. Past* 14, 1–20.

INDECI. (2013). Anuario de Estadísticas Ambientales 2013. Fenómenos naturales y emergencias, Instituto Nacional de Defensa Civil.

INRENA (1995). Mapa Ecológico del Perú. 1era. reimpresión. Lima Perú.

INRENA. (1996). Guía explicativa del mapa forestal del Perú. Lima.

Jimenez, J., Marengo, J., Alves, L., Sulca, J., Takahashi, K., Ferret, S., y Collins, M. (2019). The role of ENSO flavours and TNA on recent droughts over Amazon forests and the Northeast Brazil region. *International Journal of Climatology*, 2019;1-20. <https://doi.org/10.1029/2020JD032565>

Kendall, M. G. (1975). *Rank correlation methods*, Charles GrittSn, London.199 p.

Krois, J., Shulte, A., Pajares, E. y Cerdam, C. (2013). Temporal and spatial characteristics of rainfall patterns in the Northern Sierra of Peru – A case study for La Niña to El Niño transitions from 2005 to 2010. *Espacio y Desarrollo* N° 25, 2013, pp. 23-48 (ISSN 1016-9148).

Kundzewicz, ZW; Rosbjerg, D; Simonovic, SP; Takeuchi, K. 1993. Extreme hydrological events in perspective, *Extreme hydrological events: Precipitation, Floods and Drought*.

Lagos, P., Silva, Y., Nickl, E. (2005). El Niño y la precipitación en los Andes del Perú. *Bol. Soc. Geol. Lima Espec.* 6, 7–23

Lau, J. (2017). Utilización del índice meteorológico de incendios forestales (Fire Weather Index) en el departamento de Cusco. Tesis para optar el grado de Ingeniero Meteorólogo, Facultad de Ciencias, Universidad Nacional Agraria la Molina, Lima.

Laurance, W. F., Ferreira, L. V., Rankin-de Merona, J. M., y Laurance, S. G. (1998). Rain forest fragmentation and the dynamics of Amazonian tree communities. *Ecology*, 79(6), 2032-2040.

Linsley J.R., Kohler, M. A., Paulhus, J. C. (1975). *Hydrology for engine-ers* (segunda edición). McGraw Hill. New York.

Liu, X., Liu, B., Henderson, M., Xu, M., y Zhou, D. (2015). Observed changes in dry day frequency and prolonged dry episodes in Northeast China. *International Journal of Climatology*, 35(2), 196–214. <https://doi.org/10.1002/joc.3972>

Lloret, F., y Zedler, P. H. (2009). The effect of forest fire on vegetation. *Fire effects on soils and restoration strategies*, 257-295.

Madhavapeddy, D., y Thamma, R. (2011). Reflection and Transmission of Electromagnetic Waves in a Non-Stationary Medium.

Malhado, ACM. (2005). The drought of the century in the Amazon basin: an analysis of the regional variation of rainfall in South America in 1926. *Acta Amazonia* 35(2): 231–238, doi: 10.1590/S0044-59672005000200013.

Mann, H. B. (1945). Non-parametric tests against trend. *Econometrica*. 13, 245-259.

Manta, M.I. (2007), Evaluación de las causas naturales y socioeconómicas de los incendios forestales en América del Sur. Cuarta Conferencia Mundial de Incendios Forestales. Ed. por Johann Goldammer. 17 p. Sevilla, del 11-14 de mayo.

Manta, M.I. (2017). Contribución al conocimiento de la prevención de los incendios forestales en la sierra peruana, Lima, Perú. Fondo editorial: UNALM.

Manta, M.I. y Alarcón, C. (2008) Operational fire danger rating system in Perú. In International Workshop on Advanced in Operational Wheatear System for Fire Danger Rating. WMO/Canadian Forestry Services. Edmonton, Canadá, del 14 al 16 de julio.

Manta, M.I. y León, H. (2004). Los incendios forestales en el Perú: grave problema por resolver. *Floresta*, 34(2): 2-9.

Manta, M.I., Kometter, R. y Navia, A. (2018). Evaluation of wildfire danger in the Peruvian Andes: First step for its reduction and adaptation. VIII International Conference on Forest Fire Research At: Coimbra, Portugal. doi: 0.14195/978-989-26-16-506_4

Marengo, J. A., Nobre, C. A., Tomasella, J., Oyama, M., Sampaio, G., Camargo, H., y Alves, L. (2008). The Drought of Amazonia in 2005. *Journal of Climate*. Vol. 21, No. 3, 495-516.

Marengo, J. A., Tomasella, J., Alves, L., Soares, W. y Rodriguez, D. A. (2011). The Drought of 2010 in the Context of Historical Droughts in the Amazon Region, *Geophysical Research Letters*, Vol. 38, No. 12, 2011, pp. 1-5.

Marengo, J.A. y Espinoza, J.C. (2015) Extreme Seasonal Droughts and Floods in Amazonia: Causes, Trends and Impacts. *International Journal of Climatology*, 36, 1033-1050. <http://dx.doi.org/10.1002/joc.4420>

Marengo, JA., Soares, WR., Saulo, C. y Nicolini, M. (2004). Climatology of the Low Level Jet East of the Andes as derived from the NCEP-NCAR reanalysis. Characteristics and temporal variability. *Journal of Climate*, 17: 2261-2280.

Mas, J. (2011). Aplicaciones del sensor MODIS para el monitoreo del territorio. Instituto Nacional de Ecología (INE).

Mataix-Solera J., Cerdà A., Arcenegui V., Jordán A y Zavala L.M., (2011). Fire effects on soil aggregation: A review, *Earth-Science Reviews*, 109, 44-60. doi: doi.org/10.1016/j.earscirev.2011.08.002

McCabe, G. J., Legates, D. R., y Lins, H. F. (2010). Variability and trends in dry day frequency and dry event length in the southwestern United States. *Journal of Geophysical Research*, 115(D7), 1–8. <https://doi.org/10.1029/2009jd012866>

McKee, T. B., Doesken, J. y Kleist, J. (1993). The relationship of drought frequency and duration of time scales. Eighth Conference on Applied Climatology, American Meteorological Society, Washington DC, pp.179-186.

Menne, M. J. y Williams, C. N. (2009). Homogenization of temperature series via pairwise comparisons. *Journal of Climate*, 22(7):1700-1717.

Meza, J. C. (2020). Análisis comparativo de los modelos digitales de elevaciones SRTM y MDE-Ar 2.0 para la identificación de áreas de peligrosidad por inundaciones y anegamientos en un área urbana de llanura. *Geográfica Digital*, 17(33), 44-60. doi: 17. 44. [10.30972/geo.17334015](https://doi.org/10.30972/geo.17334015).

MINAM (2017). Diseño Metodológico para el desarrollo de un modelo predictivo de incendios. Dirección General de Ordenamiento Territorial Ambiental – DGOTA.

MINAM (2019a). Mapa nacional de ecosistemas.

MINAM (2019b). Resumen Ejecutivo - Registro Histórico de Incendios Sobre la Cobertura Vegetal a Nivel Nacional. Dirección General de Ordenamiento Territorial Ambiental – DGOTA.

MINAM. (2012). Mapa de Cobertura Vegetal del Perú. Perú.

Miró, J., Estrela, M., Pastor, F. y Millán, M. (2009). Análisis comparativo de tendencias en la precipitación, por distintos inputs, entre los dominios hidrológicos del Segura y del Júcar (1958-2008). *Invest. Geogr.* 49. 129-157. 10.14198/INGEO2009.49.07.

Mishra, K., y Singh. V. (2010). A Review of Drought Concepts. *Journal of Hydrology*, July, 203– 12.

Morisette, J., Privette, J., y Justice, C., (2002). A framework for the validation of MODIS Land products, *Remote Sensing of Environment*, 83:77-96.

Murai. S. (1999). Libro de trabajo SIG. Volumen 1: Curso Básico. En *Revista SELPER*. 15(1) p 8-66.

Myers, R. (2007). Conceptos básicos en el manejo integral del fuego. In *Taller Internacional: Nuevas Estrategias para el Manejo Integral del Fuego en Ecosistemas Tropicales Prioritarios para la Conservación*. Puerto Maldonado: The Nature Conservancy y ProNaturaleza.

National Climatic Data Center, (2003). Coop summary of the day-CDMP-Pre, Data documentation for data set 3206 (DSI-3206). 18p.

Nobre, C. A., Sampaio, G., Borma, L. S., Castilla-rubio, J. C., Silva, J. S., y Cardoso, M. (2016). Land-use and climate change risks in the Amazon and the need of a novel sustainable development paradigm, 113(39), 10759–10768. <http://doi.org/10.1073/pnas.1605516113>.

Olaya V. (2011). *Sistemas de Información Geográfica*. Versión 1. marzo 2011. Disponible en: ftp://ftp.ehu.es/cidra/profis/iipbaiza/Libro_SIG.pdf.

OMM, 2012 Índice normalizado de precipitación. Guía del usuario. N° 1090

ONERN (1977). Inventario, Evaluación y Uso racional de los recursos naturales de la zona norte del departamento de Cajamarca, Volumen I. Lima, Perú.

ONERN. (1976). Guía explicativa del Mapa Ecológico del Perú. Perú.

ONERN. (1980). Inventario nacional de lagunas y represamientos: segunda aproximación. Perú.

Palmer, WC. (1965). Meteorological drought. Research Paper N. 45, U.S. Department of Commerce Weather Bureau, Washington DC. 58p.

Palomino, Z. (2015). Efecto del cambio climático en la hidrología de la cuenca Chancay-Huaral. Tesis para optar el grado de Ingeniero Agrícola, Facultad de Ingeniería Agrícola, Universidad Nacional Agraria la Molina, Lima.

Paredes, M. (2018). Uso de índices de vegetación del sensor Modis – Terra en la estimación de biomasa aérea de Pajonales Altoandinos. Tesis para optar el título de Ingeniero Zootecnista, Facultad de Zootecnia, Universidad Nacional Agraria la Molina, Lima.

Peña, J. (2008). 2 ed. Sistemas de información geográfica aplicados a la gestión del territorio. Editorial Club Universitario. España. 310 p

Piazzese, J. y Oñate, E. (2003). Metodología para la obtención de información geográfica, geofísica y geo-ambiental desde imágenes satelitales. Obtenido de Scipedia: https://www.scipedia.com/public/Piazzese_O%C3%B1ate_2003a

Pinty, B. y Verstraete, M.M. (1992). GEMI: a nonlinear index to monitor global vegetation from satellites. *Vegetation*, 101, 15-20.

Poveda, G. (2004). La hidroclimatología de Colombia: Una síntesis desde la escala interdecadal hasta la escala diaria. *Revista de la Academia de Ciencias*, 28: 201-222.

Presutti M. (2009). Comparación de un DEM generado a partir de curvas de nivel con el DEM-SRTM para estimar la altura de plantaciones forestales. *Anais XIV Simposio Brasileiro de Sensoriamento Remoto, Natal, Brasil, INPE*, p. 2943-2950.

Pulwarty, R., Barry, R., Hurst, C., Sellinger, K. y Mogollon, L. (1998). Precipitation in the Venezuelan Andes in the context of regional climate. *Meteorology and Atmospheric Physics*. 67: 217-237.

Qin, Y., Yang, D., Lei, H., Xu, K., y Xu, X. (2015). Comparative analysis of drought based on precipitation and soil moisture indices in Haihe basin of North China during the period of 1960-2010. *Journal of Hydrology*, 526, 55–67. <https://doi.org/10.1016/j.jhydrol.2014.09.068>

Ramos, M., Carrasco, Y., Miranda, C., Batista, A. y Tetto, A. (2017). Relación entre variables meteorológicas e incendios forestales en la provincia Pinar del Río, Cuba. *Revista Floresta*, 47(3), 343-352.

Richard, R. y Heim, Jr. (2002). A review of twentieth-century drought indices used in the United States, *Bulletin of the American Meteorological Society*, Vol. 83, No. 8, pp. 1149–1166.

Rodgers, K. (1993). Manual sobre el manejo de peligros naturales en la planificación para el desarrollo regional integrado. Departamento de Desarrollo Regional y Medio Ambiente. Organización de Estados Americanos. Washington, D.C. (en línea). Consultado septiembre 2012. Disponible en: <http://www.oas.org>

Rodríguez, J. (2003). Introducción a la programación. Teoría y práctica, Alicante, España: Editorial Club Universitario.

Rodríguez, J. y Olivella, R. (2010). Introducción a los sistemas de información geográfica, conceptos y operaciones fundamentales. Universidad Oberta De Catalunya,

Rodríguez, V. y Bullock, S. (2013). Comparación espacial y temporal de índices de la vegetación para verdor y humedad y aplicación para estimar LAI en el Desierto Sonorense por resolver. *Revista mexicana de ciencias agrícolas*, 4(4): 611-623.

Ronchail, J. (1995). Variabilidad interanual de las precipitaciones en Bolivia. *Bulletin de l'Institut Français d'Études Andines*.

Rosete, F y Bocco, G. (2003). Los sistemas de información geográfica y la percepción remota. Herramientas integradas para los planes de manejo en comunidades forestales. (en línea) Instituto Nacional de Ecología Consultado 15 jun. 2014. Disponible en <http://www2.inecc.gob.mx/>

Rouse, J.W., Hass, R.H., Schell, J.A., y Deering, D.W. (1974). Monitoring vegetation systems in the Great Plains with ERTS. Proceedings, third Earth Resources Technology Satellite-1 Symposium, Greenbelt, NASA SP-351 (pp. 309-317).

Royé, D. y Serrano, R. (2019). Introducción a los SIG con R, Zaragoza, España: Prensas de la Universidad de Zaragoza.

RPP (2016). <http://rpp.pe/blog/mongabay/infografia-cuales-la-situacion-de-los-incendios-forestales-en-peru-noticia-1011966>. Visto ultima vez 12-06-2018.

Rudorff, B.F.T., Y. E. Shimabukuro y J. C. Ceballos. (2007). O Sensor MODIS e suas Aplicações Ambientais No Brasil. São José dos Campos S.P. Brasil. Editorial Parentese, pp. 428.

Russell, C.S., Arey, D.G. y Kates, RW. (1970). Drought and water supply. Johns Hopkins University Press. Baltimore (EE.UU.). 232p.

Rutllant J.A., Fuenzalida H. y Aceituno P. (2003). Climate dynamics along the arid northern coast of Chile: The 1997–1998 Dinámica del Clima de la Región de Antofagasta (DICLIMA) experiment, J. Geophys. Res., 108(D17), 4538, doi:10.1029/2002JD003357.

Sabuco, P. (2013). La problemática de los incendios forestales y bases para su teledetección en el Perú. Apuntes de Ciencia & Sociedad 3(2). <https://doi.org/10.18259/acs.2013017>

Sánchez, J.M., Caselles, V., Bisquert, M.M., Paz Andrade, M.I. y Legido, J.L. (2008). Estimación del riesgo de incendio en Galicia a partir de imágenes EVI del Sensor Terra MODIS. Revista de Teledetección, 30, 71-84.

Sánchez, W., Schimitt, C. (2018). Partículas Absorbentes de Luz durante El Niño y El Niño Costero en los Glaciares de la Cordillera Blanca, Perú. Revista de glaciares y ecosistemas

de montaña, Instituto Nacional de Investigación en Glaciares y Ecosistemas de Montaña, 3(4): 9-22.

Saulo, A., Nicolini, M. y Chou, S. (2000). Model characterization of the South American low-level flow during the 1997-1998 spring-summer season. *Climate Dynamics*, 16: 867-881.

Seluchi, M. y Marengo, J. (2000). Tropical-midlatitude exchange of air masses during summer and winter in South America: climate aspects and examples of intense events. *International Journal of Climatology*, 20: 1167- 1190.

SENAMHI (1988). Mapa de Clasificación Climática del Perú. Método de Thornthwaite.

SENAMHI (2012). Caracterización climática de las regiones Apurímac y Cusco.

SENAMHI (2016). Ciclos horarios de precipitación en el Perú utilizando información satelital. Lima, Perú.

SENAMHI (2017a). Variabilidad climática y ocurrencia de sequías en la región de Cajamarca.

SENAMHI (2017b). Uso del producto grilla de precipitación en estudios, investigaciones y sistemas operacionales de monitoreo y pronóstico hidrometeorológico. SENAMHI – DHI -2017, Lima, Perú.

SENAMHI (2018). Estudio de las condiciones atmosféricas favorables a los incendios forestales en el Perú, Lima, Perú.

SENAMHI (2019). Caracterización espacio temporal de la sequía en los departamentos altoandinos del Perú (1981-2018). Lima, Perú.

SERFOR (2018). Plan de prevención y reducción de riesgos de incendios forestales, Periodo 2019 – 2022.

Shakesby, R. A. (2011). Post-wildfire soil erosion in the Mediterranean: review and future research directions. *EarthScience Reviews*, 105(3), 71-100

Shilsky, A., Waugh, J., Gonzalez, P., Gonzalez, M., Manta, M. I., Santoso, H., Ainuddin Nuruddin, A., Rodríguez, A., Schmidt, D., Myers, R., Kearns, F., Johnson, D., Zollner, D. (2007). *Fire, Ecosystems and People: Strategies for Global Biodiversity Conservation*. TNC. EE.UU. 20 p.

Silva, C. (2012). *Evaluación de los ensayos de introducción de especies forestales y mejoramiento genético en el departamento de Cajamarca*. Tesis para optar el grado de Ingeniero Forestal, Facultad de Ingeniería Forestal, Universidad Nacional Agraria la Molina, Lima.

Silva, D. G. (2007). *Evolução Paleoambiental dos Depósitos de Tanques em Fazenda Nova, Município de Brejo da Madre de Deus - Pernambuco*. (Dissertação de Mestrado). Recife: UFPE.

Smith, J. 2006. *The Facts on File Dictionary of Weather and Climate*. Revised Edition. USA. 273pp.

Sulca J., Vuille M., Silva Y. y Takahashi K. (2016). Teleconnections between the peruvian central Andes and northeast Brazil during extreme rainfall events in austral summer. *Journal of hydrometeorology*.

Teillet, P. M., Staenz, K. y Williams, D. J. (1997). Effects of spectral, spatial, and radiometric characteristics on remote sensing vegetation indices of forested regions. *Remote sensing of environment*, 61(1), 139-149.

Thornthwaite, C. (1931). The Climates of North America According to a New Classification. *Geographical Review*, 21, 633– 55.

Tiedeman, J; Zerda, H; Grillo, M y Ravelo, A. (2010). Distribución espacial de anomalías del NDVI derivado del sensor VEGETATION SPOT 4/5 y su relación con las coberturas vegetales, usos de la tierra y características geomorfológicas en la provincia de Santiago del Estero, Argentina. *Revista Ambiente*, 6(3), 379 – 391.

Tobón, C. y Arroyave, F. (2008). *Hidrología de los bosques alto-andinos*. Ecología de Bosques Andinos. Editado por J.D. León. Universidad Nacional de Colombia. 213 p.

Torres, C. y Pabón, J. (2017). Variabilidad intraestacional de la precipitación en Colombia y su relación con la oscilación de Madden-Julian. *La Revista de la Academia Colombiana de Ciencias Exactas, Físicas y Naturales*, 41(158):79-93. <http://dx.doi.org/10.18257/raccefyn.380>

UCAR. (2009). *Topographic Influences on Wildland Fire Behavior. UNIT 2. The Comet Program.*

USAID, USDA (2015). *Reporte de Evaluación del Manejo de Incendios Forestales en el Perú.*

Uvo, C., Repelli, C., Zebiak, S., Kushnir, Y. (1998). The relationship between tropical pacific and atlantic SST and northeast Brazil monthly precipitation, *J. Clim.*, 11, 551–562.

Valiente, OM. (2001). *Sequias, definiciones, tipologías y métodos de cuantificación.*

Vásquez, C. (2009). *Estudio hidrológico de la región Cajamarca 2010-2011. Gobierno Regional de Cajamarca.*

Vera C., Higgins W., Amador J., Ambrizzi T., Garreaud R.D., Gochis D., Gutzler D., Lettenmaier, D., Marengo J., Mechoso C., Nogues-Paegle J., Silva Diaz P.L. y Zhang C. (2006). Towards a unified view of the American Monsoon System, *J. Climate*, 19, 4977–5000.

Vermote, E., Roger, J., Ray, J. (2015). *MODIS Surface Reflectance User's Guide. Collection6.Version 1.4.*

Vicente, J. (2014). *Análisis de la evolución de sequías con metodologías de teledetección. Tesis para optar el grado de Magister, Facultad de Ingeniería y Ciencias Hídricas, Universidad Nacional del Litoral, Santa Fe.*

Vincent, L. A., Zhang, X., Bonsal, B., y Bonsal, W. (2002). Homogenization of daily temperatures over canada. *Journal of Climate*, 1322-1334.

Vuille M. (2013). *Climate change and water resources in the tropical Andes. Interamerican Development Bank Technical Note No. IDB-TN515.*

Vuille M. y Werner M. (2005). Stable isotopes in precipitation recording South American summer monsoon and ENSO variability: observations and model results. *Climate Dynamics* 25, 401–413.

Wan, Z. (2013). MODIS Land Surface Temperature Products Users Guide. Collection 6. ERI, University of California, Santa Barbara.

Wan, Z. y Li, Z.L. (2008). Radiance-based validation of the MODIS land-surface temperature product, *International Journal of Remote Sensing*, 29: 5373-5395.

Wan, Z., Hook, S., y Hulley, G. (2015). MOD11A2 MODIS/Terra Land Surface Temperature/Emissivity 8-Day L3 Global 1 km SIN Grid V006. NASA EOSDIS Land Processes DAAC, USGS Earth Resources Observation and Science (EROS) Center. <https://lpdaac.usgs.gov> (accessed 16 June 2016): Sioux Falls, SD, doi, 10.

Wan, Z., Wang, P. y Li, X. (2004). Using MODIS Land Surface Temperature and Normalized Difference Vegetation Index products for monitoring drought in the southern Great Plains, USA. *International Journal of Remote Sensing*, 25(1): 61-72.

Williams, E., Dall'Antonia, A., Dall'Antonia, V., de Almeida, J., Suarez, F., Liebmann, B., Malhado, ACM. (2005). The drought of the century in the Amazon basin: an analysis of the regional variation of rainfall in South America in 1926. *Acta Amazonia* 35(2): 231–238, doi: 10.1590/S0044-59672005000200013.

Willmott, C. J., Robeson, S. M. y Matsuura, K. (2012). A refined index of model performance. *Int. J. Clim.* 32, 2088–2094.

Wu, H., Hayes, M. J., Wilhite, D. A., y Svoboda, M. D. (2005). The effect of the length of record on the standardized precipitation index calculation. *International Journal Climatology*, 25, 505-520.

Xiong J. (2008). MCST Calibration Information, URL: <http://www.mcst.ssai.biz/mcst-web/calib/calibration.html> (Última fecha de acceso: 28 de septiembre de 2008).

Ying, L., Han J., Du, Y., Shen, Z. (2018). "Forest fire characteristics in china: Spatial patterns and determinants with thresholds", *Forest Ecology and Management*, vol. 424, pp. 345-354. <https://doi.org/10.1016/j.foreco.2018.05.020>

Zeng, N., Yoon, J.H., Marengo, J.A, Subramaniam, A., Nobre, C.A., Mariotti, A. y Neelin, D. (2008). Causes and impacts of the 2005 Amazon drought. *Environ. Res. Lett.* 3: 014002, doi: 10.1088/1748-9326/3/1/014002.

Zhou, J. y Lau, K. (1998). Does a monsoon climate exist over South America? *Journal of Climate*, 11: 1020-1040.

Zubieta, R. (2017). Estimación de concentración de lluvia diaria y eventos hidrológicos extremos en cuencas andino-amazónicas empleando precipitación basada en satélites Tesis para optar el grado de Doctoris Philosophiae, Escuela de Posgrado, Universidad Nacional Agraria La Molina, Lima.

Zubieta, R., Getirana, A., Espinoza, J. C., Lavado-Casimiro, W., y Aragon, L. (2017). Hydrological modeling of the Peruvian-Ecuadorian Amazon Basin using GPM-IMERG satellite-based precipitation dataset, *Hydrol. Earth Syst. Sci.*, 21, 3543-3555, doi.org/10.5194/hess-21-3543-2017

Zubieta R., Prudencio F., Alarco G. y Reupo, J. (2019). Ocurrencia de incendios forestales durante eventos El Niño. *Boletín Técnico Generación de modelos climáticos para el pronóstico de la ocurrencia del Fenómeno El Niño*. Instituto Geofísico del Peru 6, 5–9.

Zulkafli, Z., Buytaert, W., Onof, C., Manz, B., Tarnavsky, E., Lavado, W., y Guyot, J.L. (2014). A Comparative Performance Analysis of TRMM 3B42 (TMPA) Versions 6 and 7 for Hydrological Applications over Andean – Amazon River Basins. *Journal of Hydrometeorology*, 15(2), 581–592. <https://doi.org/10.1175/JHM-D-13-094.1>

VIII. ANEXOS

Anexo 1: Script en lenguaje de programación R para la clasificación de incendios forestales por tipo de ecosistema

```
library(raster)
library(dplyr)
library(sf)
rm(list=ls())
setwd('C:/LOCACIÓN 2021/')
reg <- c('Cajamarca','Cusco')
cambio_caj <- c('Otro','Matorrales andinos','Bosques naturales','Pastizales andinos','Bosques
naturales', 'Bosques naturales',
              'Pastizales andinos','Bosques naturales','Pastizales andinos','Bosques
naturales','Otro')

cambio_cus <- c('Pastizales andinos','Matorrales andinos','Pastizales andinos','Bosques
naturales','Otro','Otro','Pastizales andinos',
              'Bosques naturales','Bosques naturales','Bosques naturales','Otro','Bosques
naturales','Otro','Otro')
lista_cambio <- list(cambio_caj,cambio_cus)
for (i in 1:2) {
  ecosim <- read_sf(paste0('shapefiles/Incendios_byEcosistema_',reg[i],'.shp'))
  name_eco <- unique(ecosim$ecosstm)
  cambio <- lista_cambio[[i]]
  eco <- ecosim %>% mutate(vegetacion=ecosstm)
  for (k in 1:14) {
    eco$vegetacion[eco$vegetacion == name_eco[k]] <- cambio[k]
  }
  st_write(eco,paste0('shapefiles/Incendios_byVegetacion_',reg[i],'.shp'))
}
```


Anexo 3: Script en lenguaje de programación R para la extracción de índices vegetativos cada 8 días por tipo de vegetación

```
library(raster)
library(sf)
library(dplyr)
library(ncdf4)
library(velox)
rm(list=ls())
setwd('F:/C/LOCACIÓN 2021/')
reg <- c('CAJAMARCA','CUSCO')
indice_name <- c('GVMI','VARI','NDWI','NDII','SAVI','EVI','GEMI','NDVI')
reg_name <- c('Cajamarca','Cusco')
veg_name <- c('Matorrales andinos','Bosques naturales','Pastizales andinos')
for (k in 2002:2016) {
  tserie <- seq(as.Date(paste0(k,'-01-01')),as.Date(paste0(k,'-12-31')),by='8 days')
  if(k==2002) {date=tserie} else {date=c(date,tserie)}
}
for (q in 1:8) {
  for (i in 1:2) {
    shp <- read_sf(paste0('shapefiles/Incendios_byVegetacion_',reg[i],'.shp')) %>%
st_transform('+proj=longlat +datum=WGS84 +no_defs')
    index_lista <- list.files('F:/C/LOCACIÓN/imagenes recortadas', pattern = paste0(reg[i],'-
MOD09A1.006_sur_',indice_name[q]),full.names = T)
    velox_block <- stack(index_lista) %>% velox()
    lista <- list()
    for (j in 1:3) {
      print(date())
      shp_veg <- shp %>% filter(vegetacion==veg_name[j])
      variable_extract <- velox_block$extract_points(sp=shp_veg) %>% as.data.frame() %>%
apply(2,mean,na.rm=T) %>% as.vector()
      df_extract <- data.frame(variable=variable_extract,date=date) %>%
mutate(year=substr(date,1,4),month=substr(date,6,7) %>% as.numeric(),
day=substr(date,9,10) %>%
as.numeric(),vegetacion=rep(veg_name[j],length(date)))
      lista[[j]] <- df_extract
    }
    tabla_byReg <- do.call(rbind, lista)
write.table(tabla_byReg,paste0('textos/',indice_name[q],'_8day_byVegetation_',reg_name[i]
),'.txt'),sep=',')
  }
}
```

Anexo 4: Script en lenguaje de programación R para la extracción de precipitación y temperatura máxima por tipo de ecosistema

```
library(raster)
library(sf)
library(dplyr)
library(ncdf4)
library(velox)
rm(list=ls())
#-----Precipitación
setwd('C:/LOCACIÓN 2021/')
rut_pisco <- 'pisco/PISCOv2.1pd.nc'
nc <- nc_open(rut_pisco)
block <- brick(rut_pisco,varname='variable')
velox_block <- velox(rut_pisco) #en caso de pisco, se puede abrir directamente el archivo
pisco con la función velox()
shp <- read_sf('shapefiles/Incendios_byVegetacion_Cajamarca.shp') %>%
st_transform(crs(block))
veg_name <- c('Matorrales andinos','Bosques naturales','Pastizales andinos')
reg <- c('Cajamarca','Cusco')
date <- seq(as.Date('1981-01-01'), as.Date('2016-12-31'), by = 'day')
for (i in 1:2) {
  shp <- read_sf(paste0('shapefiles/Incendios_byVegetacion_',reg[i],'.shp')) %>%
st_transform(crs(block))
  lista <- list()
  for (j in 1:3) {
    print(date())
    shp_veg <- shp %>% filter(vegetacion==veg_name[j])
    variable_extract <- velox_block$extract_points(sp=shp_veg) %>% as.data.frame() %>%
apply(2,mean,na.rm=T) %>% as.vector()
    df_extract <- data.frame(variable=variable_extract,date=date) %>%
mutate(year=substr(date,1,4),month=substr(date,6,7) %>% as.numeric(),
        day=substr(date,9,10) %>%
as.numeric(),vegetacion=rep(veg_name[j],length(date)))
    lista[[j]] <- df_extract
  }
  tabla_byReg <- do.call(rbind, lista)
  write.table(tabla_byReg,paste0('textos/Precip_day_byVegetation_',reg[i],'.txt'),sep=',')
}
_extract <- velox_block$extract_points(sp=shp_veg) %>% as.data.frame() %>%
apply(2,mean,na.rm=T) %>% as.vector()
df_extract <- data.frame(variable=variable_extract,date=date) %>%
mutate(year=substr(date,1,4),month=substr(date,6,7) %>% as.numeric(),
```

```

                                day=substr(date,9,10)                                %>%
as.numeric(),vegetacion=rep(veg_name[j],length(date)))
  lista[[j]] <- df_extract
}
  tabla_byReg <- do.call(rbind, lista)
  write.table(tabla_byReg,paste0('textos/Precip_month_byVegetation_',reg[i],'.txt'),sep=',')
}
#----Temperatura máxima
library(raster)
library(sf)
library(dplyr)
library(ncdf4)
library(velox)
rm(list=ls())
setwd('C:/LOCACIÓN 2021/')
rut_pisco <- 'pisco/PISCOdtx_v1.1.nc'
nc <- nc_open(rut_pisco)
block <- brick(rut_pisco,varname='tx')
velox_block <- velox(rut_pisco) #en caso de pisco, se puede abrir directamente el archivo
pisco con la función velox()
veg_name <- c('Matorrales andinos','Bosques naturales','Pastizales andinos')
reg <- c('Cajamarca','Cusco')

date <- seq(as.Date('1981-01-01'), as.Date('2016-12-31'), by = 'day')
for (i in 1:2) {
  shp <- read_sf(paste0('shapefiles/Incendios_byVegetacion_',reg[i],'.shp')) %>%
st_transform(crs(block))
  lista <- list()
  for (j in 1:3) {
    print(date())
    shp_veg <- shp %>% filter(vegetacion==veg_name[j])
    variable_extract <- velox_block$extract_points(sp=shp_veg) %>% as.data.frame() %>%
apply(2,mean,na.rm=T) %>% as.vector()
    df_extract <- data.frame(variable=variable_extract,date=date) %>%
mutate(year=substr(date,1,4),month=substr(date,6,7) %>% as.numeric(),
                                day=substr(date,9,10)                                %>%
as.numeric(),vegetacion=rep(veg_name[j],length(date)))
    lista[[j]] <- df_extract

```

Anexo 5: Script en lenguaje de programación R para el cálculo de deciles de precipitación y temperatura máxima por tipo de vegetación

```
library(dplyr)
rm(list = ls())
setwd('C:/LOCACIÓN 2021/')
reg_name <- c('Cajamarca','Cusco')
vegetacion_name <- c('Matorrales andinos','Bosques naturales','Pastizales andinos')
variable_name <- c('Precip','Temp')
for (q in 1:2) {
  for (i in 1:2) {
    ppd <- read.csv(paste0('textos/',variable_name[q],'_day_byVegetation_',reg_name[i],'.txt')) %>%
filter(year>=2002)
    for (j in 1:3) {
      ppd_byVeg <- ppd %>% filter(vegetacion==vegetacion_name[j])
      for (k in 1:12) {
        ppd_month <- ppd_byVeg %>% filter(month==k)
        deciles <- quantile(ppd_month$variable, prob=seq(0, 1, length = 11))
        decil_1 <- deciles[2] %>% as.numeric()
        decil_5 <- deciles[6] %>% as.numeric()
        decil_9 <- deciles[10] %>% as.numeric()
        if (k==1) {d1 = decil_1} else {d1=c(d1,decil_1)}
        if (k==5) {d5 = decil_5} else {d5=c(d5,decil_5)}
        if (k==9) {d9 = decil_9} else {d9=c(d9,decil_9)}
      }
      if (j == 1) {x=d1} else {x=c(x,d1)}
      if (j == 5) {y=d5} else {y=c(y,d5)}
      if (j == 9) {z=d9} else {z=c(z,d9)}
    }
    df_deciles <- data.frame(decil_1=x,decil_5=y,decil_9=z,month=rep(1:12,3),vegetacion=rep(vegetacion_
name,each=12))
    write.table(
df_deciles,paste0('textos/',variable_name[q],'_deciles_byVegetation_',reg_name[i],'.txt'),
sep = ',')
  }
}
```