

UNIVERSIDAD NACIONAL DE SAN CRISTÓBAL DE HUAMANGA

FACULTAD DE INGENIERÍA DE MINAS, GEOLOGÍA Y CIVIL

ESCUELA PROFESIONAL DE INGENIERÍA CIVIL



EVALUACIÓN DE SEQUÍAS REGIONALES A PARTIR DEL USO INTEGRADO DE ÍNDICES E INDICADORES, CUENCA DEL MANTARO, 2018.

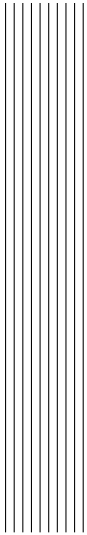
TESIS PARA OPTAR EL TÍTULO PROFESIONAL DE
INGENIERO CIVIL

PRESENTADO POR EL BACHILLER:
JUAN CARLOS ALARCÓN SUELDO

ASESOR:
MSC. ING. EDMUNDO CANCHARI GUTIÉRREZ

AYACUCHO - PERÚ

2019



RESUMEN

La sequía es un complejo fenómeno que se da en diferentes partes del mundo, nuestro país no es ajeno a este fenómeno en partes debido a las corrientes del fenómeno El niño y al cambio climático, según la Organización de las Naciones Unidas para la Alimentación, sus estragos se asocian a riesgos en la seguridad, por lo que surge la necesidad de monitorear sequías como un componente importante en los sistemas de alerta temprana de sequías. En ese sentido la presente investigación tiene por objetivo evaluar la posible mejora en detección de sequías al integrar índices de precipitación e índices basados en monitoreo remoto, en comparación con sólo el uso del Índice de Precipitación Estandarizado del producto PISCO.

Si bien PISCO es un repositorio con información muy valiosa, actualmente sus datos se limitan a evaluar a nivel de país. Por lo que para alcanzar los propósitos señalados, se integra los datos de precipitación PISCO con índices obtenidos mediante monitoreo remoto. La descarga del Índice de Precipitación Estandarizado se realiza directamente del Servicio Nacional de Meteorología e Hidrología del Perú, Mientras que la obtención de imágenes para la construcción del Índice de Condición de Vegetación y del Índice de Humedad de Diferencia Normalizada es gracias a la misión MODIS del satélite TERRA, paso seguido las imágenes son procesadas con ayuda Software Rstudio, obteniendo los índices mencionados. Finalmente se elaboran los mapas de persistencia de sequías, necesarios para evaluar de detección de sequías mediante uso integrado de índices.

Como principal resultado de la evaluación se tiene que los tres índices coinciden en la determinación de la condición de sequías para los años 2015, 2016 y 2017. Mientras que para el año 2018 se tiene que el SPI no coincide con el VCI y el NDMI en la determinación de la condición de sequía. Evidenciándose la necesidad del uso de mayor número de índices y mejora a nivel regional del índice SPI, todo esto en favor del fortalecimiento de los sistemas regionales de alerta temprana de sequías.

La evaluación integrada de diversos índices demuestra cierta mejora en la detección de sequías, Respecto al uso de un solo índice.

PALABRAS CLAVES:

SPI, VCI, NDMI, Precipitación PISCO, Monitoreo Remoto.

SUMMARY

Drought is a complex phenomenon that occurs in different parts of the world, our country is no stranger to this phenomenon in parts due to the currents of the phenomenon. The child and climate change, according to the United Nations Food Organization, its Havoc is associated with security risks, so there is a need to monitor droughts as an important component in early drought alert systems. In this sense, the present investigation aims to evaluate the possible improvement in drought detection by integrating precipitation indices and indices based on remote monitoring, compared with only the use of the Standardized Precipitation Index of the PISCO product.

Although PISCO is a repository with very valuable information, its data is currently limited to evaluating at the country level. Therefore, to achieve the stated purposes, PISCO precipitation data is integrated with indices obtained by remote monitoring. The download of the Standardized Precipitation Index is carried out directly from the National Meteorology and Hydrology Service of Peru, while obtaining images for the construction of the Vegetation Condition Index and the Normalized Difference Humidity Index is thanks to the MODIS mission of the TERRA satellite, step followed the images are processed with software Rstudio help, obtaining the mentioned indexes. Finally, drought persistence maps are developed, necessary to evaluate drought detection through integrated use of indexes.

The main result of the evaluation is that the three indices coincide in the determination of the drought condition for the years 2015, 2016 and 2017. While for the year 2018 the SPI does not coincide with the VCI and the NDMI in Determination of drought condition. Evidence of the need for the use of a greater number of indices and improvement at the regional level of the SPI index, all this in favor of strengthening regional systems for early warning of droughts.

The integrated evaluation of various indices demonstrates some improvement in the detection of droughts, with respect to the use of a single index.

KEY WORDS:

SPI, VCI, NDMI, Precipitation PISCO, Remote sensing.



INTRODUCCIÓN

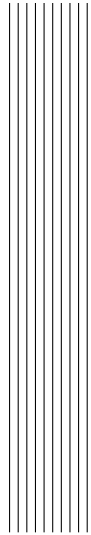
En el mundo el cambio climático y el calentamiento global están trayendo consigo un aumento en la intensidad y duración de las sequías meteorológicas y agrícolas en distintas zonas del planeta (Marcos-Garcia et al., 2017). Por lo que existe la necesidad de trabajar en la búsqueda de herramientas de gestión de sequías para el fortalecimiento de los sistemas de alerta temprana de sequías, operados por observatorios meteorológicos o institutos en los diversos países del mundo, como tal, son los índices de sequía reconocidos como el pilar de los sistemas de los sistemas de monitoreo y alerta temprana de sequías (OMM, 2002).

El Perú es vulnerable debido al cambio climático, la presencia de la corriente costera peruana y diversos otros factores que condicionan altos niveles de riesgos de sequías en diversas regiones, en tal sentido es el Servicio Nacional de Meteorología e Hidrología del Perú, SENAMHI, el encargado de monitorear sequías en base a datos de precipitaciones, además también recoge datos e información adicional sobre los impactos de las sequías a manera de tener una visión general sobre la magnitud de las sequías y sus impactos potenciales.

Si bien en la actualidad se monitorea las sequías en el país, lo cierto es que existe una deficiencia en cuanto a cobertura de estaciones en el territorio nacional, lo que conlleva a la necesidad de la utilización de plataformas satelitales, sin embargo aún en la actualidad no se tiene un uso real de la información obtenida desde el espacio para seguir los cambios en la condición de la vegetación como una forma de complementar los datos de precipitaciones de anomalía con el fin de mejorar el alcance y la eficacia de los sistemas de alerta temprana de sequías.

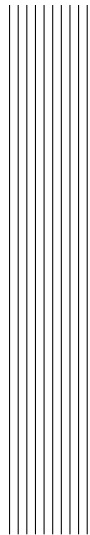
Teniendo en cuenta la necesidad del uso de plataformas satelitales es que en la presente investigación se utiliza el SPI del producto PISCO precipitación, como uno de los índices base para evaluación de sequías regionales. El SPI del producto PISCO, se construye a partir de datos de precipitación corregido con imágenes satelitales de CHIRPS- Climate Hazards Group InfraRed Precipitation with Station data.

Además del uso del SPI se integran otros dos índices, el índice de condición de vegetación, basado en el índice de vegetación mejorado y el índice de humedad de diferencia normalizada, los cuales integrados evalúan una posible mejora en la detección de sequías en la cuenca del río Mantaro. La evaluación de sequías se realiza entre los años 2015 - 2018, este periodo presenta lapsos con presencia de sequías y otros húmedos, ideales para evaluar es uso integrado de índices. Evaluar una mayor cantidad de años no serviría en mucho en la búsqueda de nuestros objetivos.



Dedicatoria

“A mi madre, una mujer luchadora, quien pese a las dificultades que la vida pone en el camino, siempre supo salir adelante, apoyarme e inculcarme valiosas enseñanzas”



Agradecimientos

A. Al Msc. Ing. Edmundo Canchari Gutiérrez, mi asesor de tesis, por su orientación y apoyo incondicional en el desarrollo de la presente investigación.

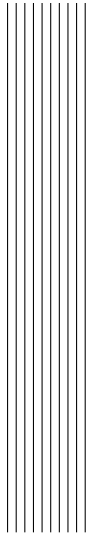
B. A mi familia, quienes lejos de cuestionarme, siempre me apoyaron en cada una de las decisiones y peldaños que emprendo en mi vida.

C. A todos los docentes de la Escuela de Formación Profesional de Ingeniería Civil, por su contribución durante mi desarrollo académico.

E. A mis amigos y compañeros de la Universidad Nacional de San Cristóbal de Huamanga y otros que contribuyeron en el desarrollo de este trabajo.

UNSCH

Ayacucho, Octubre del 2019



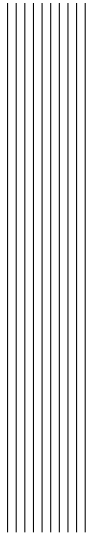
Índice general

Portada	I
Resumen	I
Introducción	II
Dedicatoria	III
Agradecimientos	IV
Índice General	V
Índice de Figuras	IX
Índice de Cuadros	XII
Glosario	1
Acrónimos	3
Simbolos	5
1. PLANTEAMIENTO DEL PROBLEMA	6
1.1. Descripción del problema	6
1.2. Delimitación del problema	8
1.2.1. Espacial	8
UNIVERSIDAD NACIONAL DE SAN CRISTÓBAL DE HUAMANGA	V

1.2.2.	Temporal	8
1.2.3.	Temática y unidad de análisis	8
1.3.	Formulación del problema	8
1.3.1.	Problema General	8
1.3.2.	Problemas Específicos	8
1.4.	Justificación e importancia de la investigación	9
1.4.1.	Justificación	9
1.4.2.	Importancia	10
1.5.	Limitaciones de la investigación	10
1.6.	Objetivos de la investigación	10
1.6.1.	Objetivos Generales	10
1.6.2.	Objetivos Específicos	10
2.	MARCO TEÓRICO	12
2.1.	Antecedentes	12
2.1.1.	Investigaciones internacionales	12
2.1.2.	Investigaciones nacionales	13
2.2.	Bases teóricas	13
2.2.1.	Precipitación por percepción remota	13
2.2.2.	Precipitación - PISCO	14
2.2.2.1.	Versiones PISCO	15
2.2.2.2.	Precipitación CHIRPS	16
2.2.2.3.	PISCOp climatología (PISCOp clim)	17
2.2.2.4.	Area de Estudio del Producto PISCO	18
2.2.2.5.	Datos PISCO	19
2.2.2.6.	Resultados del producto PISCO	19
2.2.2.7.	Novedades PISCO V2.1	21
2.2.3.	Índice de Precipitación Estandarizado (SPI)	22
2.2.4.	Índice de Vegetación de Diferencia Normalizada (NDVI)	26
2.2.4.1.	NDVI como indicador de sequía	28
2.2.5.	Índice de Condición de Vegetación (VCI)	29
2.2.6.	Índice de Humedad de Diferencia Normalizada (NDMI)	30
2.3.	Marco Conceptual	32

2.3.1.	Sequías	32
2.3.1.1.	Definición de Sequías	32
2.3.1.2.	Tipos de Sequías	33
2.3.2.	Enfoques de Vigilancia de la Sequía	35
2.3.3.	Caracterización de Sequías	36
2.3.3.1.	Severidad de la sequía	36
2.3.3.2.	Intensidad de la sequía	36
2.3.3.3.	Duración de la sequía	37
2.3.4.	Sistemas de alerta temprana de la sequía	37
2.3.5.	Índices de Sequías	38
2.3.6.	Satélite TERRA - EOS AM-1	39
2.3.6.1.	Sensor MODIS	40
2.3.6.2.	Productos MODIS	40
3.	MÉTODO DE LA INVESTIGACIÓN	42
3.1.	Enfoque	42
3.2.	Alcances	42
3.3.	Diseño de investigación	42
3.4.	Población y muestra	43
3.5.	Hipótesis de la investigación	43
3.5.1.	Hipótesis general	43
3.5.2.	Hipótesis específicas	44
3.6.	Operacionalización de variables	44
3.6.1.	Operacionalización de variables	45
3.6.2.	Variables	45
3.6.3.	Indicadores	45
3.7.	Técnicas e instrumentos	46
3.7.1.	Instrumentos utilizados.	47
3.8.	Técnicas estadísticas para el procesamiento de la información	48
3.9.	Desarrollo de la tesis	49
3.9.1.	Área de estudio	49
3.9.2.	Características de la zona de estudio	50

3.9.3. Evaluación de la calidad de series climatológicas PISCO-Análisis de consistencia	52
3.9.3.1. Curva doble masa	53
3.9.3.2. Pruebas estadísticas	53
3.9.4. Construcción del SPI	55
3.9.5. Evaluación de la calidad y corrección de los datos MODIS	59
3.9.6. Construcción del Índice de Condición de Vegetación (VCI)	86
3.9.7. Construcción del NDMI	89
3.9.8. Evaluación de la calidad de los resultados	91
4. RESULTADOS	93
4.1. Contratación de hipótesis	93
4.1.1. Persistencia de Eventos	93
4.1.2. Evaluación comparativa eventos 2015, 2016, 2017 y 2018	96
4.2. Análisis e interpretación	101
5. CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES	102
5.1. Conclusiones	102
5.2. Recomendaciones	103
5.3. Trabajos futuros	103
Referencias Bibliográficas	104
A. ANEXO 01.	107
B. ANEXO 02.	109
C. ANEXO 03.	111
D. ANEXO 04.	115
E. ANEXO 05.	119

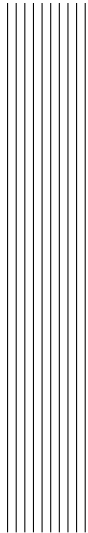


Índice de Figuras

2.1. Precipitación interpolada PISCO-precipitación.	15
2.2. a) Los puntos azules y rojos representan PISCOp y red de lluvias independiente. Los puntos en cruz indican estaciones con más de 95% de los datos entre 1981-2016 b) Ubicación de los medidores de flujos seleccionados.	19
2.3. Características del NDVI de una planta sana y enferma	27
2.4. Anomalía del NDVI en los EE.UU. en agosto de 1993.	29
2.5. Campos de maíz dañados por la sequía, Distritos de Chiara y Socos - nov 2018.	32
2.6. Tipos de Sequías.	34
2.7. Caracterización de la sequía.	37
2.8. Satélite TERRA y ubicación de sensor MODIS.	39
2.9. Productos de la versión 6 de la Reflectancia de la superficie MODIS 09.	40
2.10. Producto de la versión 6 del índice de vegetación (NDVI y EVI).	41
3.1. Recopilación de datos.	46
3.2. Estación:000664-Wayllapampa. Precipitación acumulada 2015.	48
3.3. Delimitación de la cuenca del Mantaro.	50
3.4. Precipitación mensual promedio de las estaciones PISCO, cuenca del mantaro (Período 1981-2018)	51
3.5. Análisis de doble masa para dos de las estaciones-PISCO de la cuenca del Mantaro	53
3.6. Análisis visual de consistencia de la estacion-073	54
3.7. Series de tiempo del SPI 12 meses, Cuenca de Mantaro	57

3.8. Mapas SPI período Ene2016-Dic2016. Evento Extremo Clase A	58
3.9. Mapas SPI período Ene2018-Dic2018. Evento Normal	59
3.10. Descarga de imágenes desde AppEEARS, Geo Tiff / NetCDF-4	61
3.11. Descarga del archivo Quality lookup desde AppEEARS	65
3.12. Imagen básica raster de datos EVI de la cuenca del Mantaro.	83
3.13. Mejor visualización de los datos EVI.	84
3.14. Índice de Vegetación mejorado con datos filtrados de calidad, cuenca del río Mantaro: 17-11-2018.	85
3.15. Datos filtrados de calidad de mejor visualización (17_NOV_2018)	85
3.16. Descarga de datos EVI para la Cuenca de Mantaro	87
3.17. Índice de Condición de Vegetación (VCI) a partir de datos EVI, año 2016 . .	88
3.18. Obtención de las bandas 2 y 6 para la construcción del NDMI.	89
3.19. Obtención del NDMI con ayuda del software RStudio, año 2016	90
3.20. NDMI cuenca del Mantaro, Zoom ciudad de Huancayo	91
3.21. Correlación entre los índices de sequía VCI, NDMI y SPI para sus distintas escalas de tiempo.	92
4.1. Clasificación de píxeles del SPI menores a -2.	94
4.2. Obtención de gráficos de persistencia.	95
4.3. Obtención de gráficos de persistencia.	96
4.4. Mapa de Persistencia, evento severo detectado en la cuenca Mantaro, 2016 .	98
4.5. Mapa de Persistencia, evento normal para la cuenca del Mantaro, Ene-Dic 2015	99
4.6. Mapa de Persistencia, eventos similares para la cuenca del Mantaro, 2017, 2018	100
A.1. angle=90	108
B.1. Listado de sequías año 2018	110
C.1. Índice de Condición de Vegetación (VCI) a partir de datos EVI, 2015-2016 .	112
C.2. Índice de Condición de Vegetación (VCI) a partir de datos EVI, 2017-2018 .	113
C.3. Código en RStudio para obtener los VCI en formato raster a partir del EVI .	114
D.1. Índice de Humedad de Diferencia Normalizada, NDMI, 2015-2016	116
D.2. Índice de Humedad de Diferencia Normalizada, NDMI, 2017-2018	117
D.3. Código en RStudio para la obtención de imágenes del NDMI en formato raster	118

E.1. Estructura de PISCO.	120
-----------------------------------	-----



Índice de Cuadros y Tablas

2.1. Versiones anteriores de PISCO precipitación.	16
2.2. Resumen del estado y relleno de brechas de la red de precipitaciones PISCOp: BCC(%) es el porcentaje de brechas completadas por CHIRPM con corrección de sesgo, D_n es el promedio espacial de la estadística KS y MKbef-af es el número de tendencias espurias después del procedimiento de llenado de huecos.	20
2.3. Valores del Índice de Precipitación Estandarizado.	26
2.4. Cálculo y valores de NDVI.	28
2.5. Clasificación de sequías según los VCI.	30
2.6. Clases de Sequías para valores del NDMI.	31
3.1. Operacionalización de variables identificadas	44
3.2. Resumen de variables e indicadores identificados en la investigación.	46
3.3. Estaciones meteorológicas PISCO.	52
3.4. Resultados del análisis estadístico para las estaciones-PISCO.	55
3.5. Criterios para la búsqueda de eventos extremos de sequía.	56
3.6. Clasificación de sequías según los VCI.	88
4.1. Evaluación comparativa, último cuatro años	97



GLOSARIO

Radiancia: En el flujo de energía (principalmente energía irradiante o incidente) por ángulo sólido que abandona una unidad de área de una superficie en una dirección dada, Radiancia es lo que mide el sensor y depende en cierta medida de la reflectancia.

Reflectancia de Banda: Valor obtenido a partir de la conversión de la radiancia conjuntamente con otros valores.

Teledetección: Es la ciencia y tecnología por la cual se pueden identificar las características de los objetos de interés, medir o analizar las características sin contacto directo. Por lo general, la teledetección es la medición de la energía que se emana de la superficie de la tierra.

Firma espectral: Es la reflectancia como una función de longitud de onda; cada material tiene una firma única, por lo tanto, se puede utilizar para la clasificación de materiales.

Longitud de onda: La longitud de onda también se puede explicar como la distancia que recorre la perturbación en el intervalo que transcurre entre dos puntos consecutivos equivalentes de una propiedad física de la onda.

Banda espectral: Una banda espectral designa una parte del espectro electromagnético que deja pasar un filtro estándar. Una banda espectral está determinada por su perfil de transmisión, es decir, la fracción de intensidad luminosa transmitida por una longitud de onda dada.

Normalización de datos: Consiste en aplicar una serie de reglas para evitar redundancia y proteger la integridad de los datos (Control de calidad).

Normalización de Índices: significa ajustar los valores medidos en diferentes escalas respecto a una escala común, a menudo previo a un proceso de realizar promedios.

Resolución espacial: Es la distancia que corresponde a la unidad mínima de información incluida en la imagen(pixel). Así, a menor tamaño del pixel mayor será la resolución espacial, lo que implica que el sensor obtendrá más detalle de los objetos.

Resolución espectral: Indica el número y anchura de las bandas espectrales que puede discriminar el sensor. Entre mayor sea esta resolución se tendrá información del comportamiento de una misma cobertura en diferentes bandas espectrales.

Resolución radiométrica: Nos indica la medida de bits(dígitos binarios), es la gama de valores de brillo disponibles, que en la imagen se corresponden con el alcance máximo del número Digital(ND); por ejemplo, una imagen con una resolución de 8 bits tiene 256 niveles de brillo.

Resolución temporal: Para los sensores de satélites, también existe la resolución temporal, que es el tiempo necesario para volver a visitar la misma zona de la tierra.



ACRÓNIMOS.

- SPI:** Índice de Precipitación Estandarizado.
- NDMI:** Índice de Humedad de Diferencia Normalizada.
- NDVI:** Índice de Vegetación de Diferencia Normalizada.
- EVI:** Índice De Vegetación mejorada.
- VCI:** Índice De Condición de Vegetación.
- SIG :** Sistemas de Información Geográfica.
- PISCO :** Peruvian Interpolate data of the SENAMHI's Climatological and Hydrological Observations.
- PISCO_{pm}:** Producto PISCO de precipitación mensual.
- PISCO_{pd}:** Producto PISCO de precipitación diario.
- SENAMHI:** Servicio Nacional de Meteorología e Hidrología del Perú.
- CHIRP :** Grupo de Riesgos Climáticos Precipitación por Infrarojos.
- CHIRP_m :** CHIRP modificado,(CHIRPM) mensual.
- CHIRPS :** Grupo de Riesgos Climáticos Precipitación por Infrarojos con Estaciones.
- TRMM :** Misión de Medición de Lluvias Tropicales.

TRMM 3B42 V7 : Producto 3B42 versión 7 de TRMM.

ANA : Autoridad Nacional del Agua.

OMM : Organización Meteorológica Mundial.

MINAGRI: Ministerio de Agricultura y Riego.

MINAM : Ministerio del Ambiente.

INDECI: Instituto Nacional de Defensa Civil.

NASA : Administración Nacional de la Aeronáutica y del Espacio.

CNULD : Convención de las Naciones Unidas de Lucha Contra la Desertificación.

USGS : United States Geological Survery.

MODIS : Moderate Resolution Imaging Spectroradiometer.

LANDSAT: Satélite Tierra.



SIMBOLOS.

Km : Kilómetro.

m : Metro.

% : Porcentaje.

B : Banda espectral.

ρ : Reflectancia de banda.

ρ_{SNIR} : Reflectancia de banda infrarroja cercana- NIR.

ρ_{SWIR} : Reflectancia de banda infrarroja medio- SWIR.

ρ_{RED} : Reflectancia de la banda roja- RED.

ρ_{BLUE} : Reflectancia de la banda azul- BLUE.

L : Ajuste del fondo del dosel.

mm : Milímetro.

G : Factor de ganancia.

C_i : Coeficiente de resistencia de aerosoles.

ml : Metro lineal.

t : Tiempo por unidad de distancia.



1 PLANTEAMIENTO DEL PROBLEMA

1.1. Descripción del problema

En el mundo

Desde el trabajo de Wayne Palmer en 1965 (Palmer, 1965), pasando por el índice de precipitación estandarizado por (MacKee et al., 1995) en los 90, las revisiones de estos índices a inicios de los años 2000, hasta las actuales revisiones, evaluaciones y sistematizaciones, mucho se ha escrito sobre los denominados “índices de sequía”, reconociéndolos como el pilar de los sistemas de monitoreo y alerta temprana de sequías (Nuñez and Verbist, 2018).

De acuerdo a la revisión bibliográfica inicial realizada, se evidencian 3 enfoques de vigilancia, evaluación y orientación de alerta temprana de la sequía: utilizar un único índice, utilizar varios índices y utilizar índices híbridos o mixtos. Años atrás los investigadores utilizaban un solo índice porque tenían poco tiempo para obtener datos y calcular índices derivados, siendo los índices de precipitación utilizados tradicionalmente para identificar y evaluar las sequías debido a su simplicidad y flexibilidad para comparar la salida de condiciones normales en todas las regiones y distintas escalas de tiempo (Svoboda et al., 2016).

Uno de los problemas con los cuales actualmente se encuentran los observatorios es la limitación que los índices estandarizados presentan en la evaluación de sequías bajo escenarios de cambio climático, ya que proporcionan los mismos valores para climas

actuales y futuros, independientemente de los cambios en las condiciones climáticas (Marcos-García et al., 2017). Por lo que existe la necesidad de monitorear sequías utilizando otros recursos además de los índices basados en precipitación.

A nivel del Perú

Al igual que en muchos países del mundo, en el Perú se hace uso del índice de precipitación estandarizado, SPI, como índice base del sistema de alerta temprana de sequías, este índice utiliza registros históricos de datos de pluviómetros, los cuales ofrecen una acertada información acerca de la cantidad y la frecuencia de las lluvias. Sin embargo, la baja densidad de las estaciones meteorológicas en el país amerita la utilización de procedimientos de regionalización e interpolación espacial para generar información en sitios no instrumentados, todo ello conlleva al uso de diferentes metodologías de acuerdo a los objetivos y criterios de cada investigador, lo cual adiciona un sesgo debido al uso de diferentes fuentes de datos y el tratamiento de los mismos. Para superar estos problemas el Servicio Nacional de Meteorología e Hidrología del Perú - SENAMHI, con el apoyo de instituciones internacionales crea el 2014 PISCOp - producto de precipitación, esta base de datos también ofrece de manera directa con datos del SPI para distintos meses. Una de las deficiencias del producto PISCO es que su alcance aún no posee cobertura a nivel regional según lo afirma (Aybar et al., 2019).

A nivel Regional

Tal como se menciona con anterioridad, el SPI del producto PISCO aún no posee cobertura a nivel regional, representando un problema en el avance del fortalecimiento de los sistemas de alerta temprana de sequías. En tal sentido en la presente investigación surge la necesidad de monitorear sequías a nivel regional utilizando otros índices además del SPI - PISCO. Desde hace un tiempo atrás se viene usando índices basados en monitoreo remoto, estos índices de vegetación y humedad poseen características distintas, en cuanto a su resolución y cobertura espacial, al índice SPI, representando una alternativa a los ya conocidos índices basados en precipitación.

1.2. Delimitación del problema

1.2.1. Espacial

La investigación desarrollada se enmarca en la cuenca del Río Mantaro, cuenca que abarca parte de cuatro Regiones del Perú, Pasco, Ayacucho, Huancavelica y Junín, cuyo estudio es importante por ser parte de la Región Hidrográfica del Amazonas.

1.2.2. Temporal

Los datos PISCOp precipitación con los que se trabaja en la investigación tienen un registro temporal de (1981 - 2018) y son usados para determinar el SPI.

Además de los datos PISCO, se trabaja con imágenes satelitales del sensor MODIS, que van de los años (2000-2018) y son usados para determinar el VCI y NDMI.

1.2.3. Temática y unidad de análisis

La temática es la **sequía** y las unidades de análisis en la presente investigación son los índices; Índice de Precipitación Estandarizado(SPI), Índice de Condición de Vegetación (VCI), Índice de Diferencia Normalizada de Humedad (NDMI).

1.3. Formulación del problema

1.3.1. Problema General

1. ¿Cómo es que el uso integrado de múltiples índices mejora la detección de sequías en la cuenca del Mantaro, respecto al uso de sólo el SPI?

1.3.2. Problemas Específicos

1. ¿Cuál es el nivel de aceptación que posee el SPI en cuanto a cobertura espacial?
2. ¿Por qué índices como el VCI y el NDMI, dan una visión más completa en la detección de sequías en la cuenca del Mantaro?

3. ¿Cuál de los cuatro años evaluados presenta coincidencia de eventos de sequías entre los distintos índices ?

1.4. Justificación e importancia de la investigación

1.4.1. Justificación

El Perú presenta características únicas que dificultan el monitoreo adecuado de sequías; dinámicas hidrológicas, poca cobertura de la red de monitoreo, condiciones orográficas diversas, discontinuidad de los registros, a todo esto se suma la presencia del fenómeno El Niño y el cambio climático, todos estos factores obligan a una mejora de los sistemas de alerta temprana de sequías. En tal sentido surge la necesidad de utilizar índices basados en monitoreo remoto como alternativa a la utilización de índices basados sólo en precipitación provenientes de estaciones meteorológicas, en la presente investigación se integran tres índices el SPI - PISCO (base de datos grillada) y los índices de vegetación y humedad provenientes del sensor MODIS.

Existe gran cantidad de investigaciones sobre monitoreo, evaluación y predicción de eventos de sequía utilizando distintos índices e indicadores en distintas cuencas, sin embargo, son escasas las investigaciones que integran el SPI del producto PISCO precipitación (PISCOp), el índice de condición de vegetación (VCI) que utiliza a su vez el índice de vegetación mejorado (EVI) y el índice de humedad de diferencia normalizada (NDMI), los cuales son convenientes de ser usados por presentar mejoras en cuanto a su resolución y cobertura espacial.

Se decidió realizar la investigación de la cuenca del Mantaro, por beneficiar a muchas poblaciones en cuatro regiones del país (Junín, Huancavelica, Pasco y Ayacucho) dedicadas al sector ganadero, agrícola y Energético. Además de ello la cuenca del Mantaro pertenece a la Región Hidrográfica del Amazonas, una de las más estudiadas dado su rol clave en el balance de carbono mundial (Velásquez et al., 2005).

La evaluación de índices se realiza en la cuenca del río Mantaro de la vertiente del Atlántico por ocupar el segundo lugar de prioridad de cuencas para la gestión de recursos hídricos,

considerando 31 criterios distribuidos en cinco categorías: Hidrográficas, Político administrativos, Histórico culturales, Socioeconómicos y Físico ambiental (Autoridad Nacional de Agua, 2014).

1.4.2. Importancia

La siguiente investigación promueve el uso de información espacial sobre los efectos de la sequía en los suelos y la vegetación, como una forma de fortalecer los sistemas regionales de alerta temprana de la sequía.

1.5. Limitaciones de la investigación

Pocos años atrás los investigadores se limitaban a utilizar un solo índice e indicador, por ser el único recurso a su disposición o porque tenían poco tiempo para obtener los datos. Teniendo presente lo anterior, el trabajo se limita a:

- La presente investigación se limita a evaluar sólo los años 2015-2018, según las series de tiempo del SPI, estos vendrían a ser años con exceso y ausencia de precipitación, por tanto, adecuados para evaluar las bondades de la integración de varios índices de sequía.
- El presente estudio se limita al uso de sólo 3 índices de sequía para la evaluación de eventuales sequías regionales (SPI, VCI Y NDMI).

1.6. Objetivos de la investigación

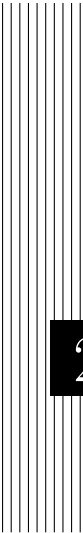
1.6.1. Objetivos Generales

1. Evaluar la posible mejora en la detección de sequías en la cuenca del Mantaro, mediante el uso integrado de índices de sequía, respecto al uso de sólo el SPI.

1.6.2. Objetivos Específicos

- 1) Determinar si el Índice de Precipitación estandarizado posee cobertura a escala regional.

- 2) Evaluar la utilidad de los índices VCI y NDMI en la detección de sequías en la cuenca Mantaro.
- 3) Determinar coincidencias en la detección de sequías entre los distintos índices, a través de los mapas de persistencia, evaluados en cuatro años.



2 MARCO TEÓRICO

2.1. Antecedentes

2.1.1. Investigaciones internacionales

Existen diversos trabajos de investigación y otros que se vienen realizando referentes a la sequía, caracterizándose cada uno de ellos en la utilización de indicadores o metodologías propuestas como determinísticos, probabilísticos y estocásticos, estudios para sequías puntuales y regionales, etc. (Li et al., 2013), emplearon las precipitaciones satelitales Tropical Rainfall Measuring Mission (TRMM) como alternativa de uso a las estaciones pluviométricas para determinar las condiciones húmedas y secas en la cuenca Poyang, China . Los datos (precipitaciones diarias y mensuales desde 1998 al 2010) fueron validados respecto a 14 estaciones de control. Como resultados se obtuvo que a escala mensual hay una buena relación lineal entre los datos de precipitación de TRMM, base del producto PISCO-precipitación, y pluviómetros. Otro de los resultados es que los algoritmos de estimación de la lluvia basados en satélites, aún no cuentan con la precisión necesaria de los datos, por lo que se dificulta el monitoreo de sequías en tiempo real.

Una de las investigaciones que se tiene presente como referencia es la del monitoreo de sequías a escala regional realizado en Colombia, para tal propósito utilizan indicadores ecohidrológicos (SPI, SSI, SRI, LSWI), los que a su vez buscan mejorar la evaluación de sequías mediante la integración de diversos índices (Rodríguez et al., 2016).

2.1.2. Investigaciones nacionales

Hace años Climate Hazards Group (CHG), realiza estimaciones cuasi-globales (50S-50N) por satélite y precipitación basados en observaciones (estaciones) sobre el planeta desde 1981 hasta la actualidad, apoyados en estos instrumentos el SENAMHI elabora la investigación conocida como PISCO. En su última versión actualizada del 21 de marzo del 2019, PISCO ha encontrado que el producto de precipitación “TRMM 2A25”, es la fuente de datos de precipitación más adecuada para el país. Por otro lado se tiene que la evaluación independiente y del balance hídrico confirman que PISCOp V2.1 es el producto más adecuado para representar las estimaciones de precipitaciones en el área, excepto en las tierras bajas del Amazonas donde CHIRPM obtuvo mejores resultados (Aybar et al., 2019).

A nivel nacional son varios los trabajos que utilizan índices basados en percepción remota para el monitoreo y predicción de sequías regionales; como el trabajo presentado por el laboratorio de teledetección de la Universidad Nacional Mayor de San Marcos, “Modelo de Predicción del Inicio de la Sequía en el Perú Usando el Índice de Vegetación Procedente de Imágenes de Satélite e Índices el Niño Oscilación Sur”, donde lograron establecer los rangos entre los cuales oscila los valores del NDVI para las diferentes regiones del país. Más recientemente se tiene la investigación de “Predicción de Sequías con Redes Neuronales Artificiales y Algoritmos Genéticos Utilizando Precipitación por Percepción Remota”, presentado por (Ayala, 2016), quien trabaja con los índices SPEI, SPI y el NDMI como datos de alimentación para su MODELO NARX, red neuronal recurrente para modelamientos no lineales y series de tiempo, obteniendo como resultado la aceptación del modelo RNA-NARX para la predicción de la sequía agrícola, utilizando precipitaciones mensuales por percepción remota y los índices climáticos globales como entradas externas.

2.2. Bases teóricas

2.2.1. Precipitación por percepción remota

En la actualidad, existen dos fuentes de estimaciones de precipitación: estaciones pluviométricas y tecnología de teledetección (Jia et al., 2011), el primero corresponde a las estaciones instaladas sobre la superficie terrestre con ubicación puntual y fija, automática o mecánica para el registro y lectura de las precipitaciones y el segundo corresponde a la teledetección

ción siendo éste multipropósito para el registro de precipitaciones, vegetación, topografía y climatología (Ayala, 2016).

2.2.2. Precipitación - PISCO

Peruvian Interpolate data of SENAMHI's Climatological and Hydrological Observation(PISCO), en su última versión, PISCOp V2.1, actualizado el 21 de marzo del 2019, es una base de datos de precipitación disponible para todo Perú desde 1981 hasta la actualidad a paso de tiempo diario y mensual. PISCOp, en su versión diaria y mensual es el resultado de la combinación de datos in situ con climatologías, reanálisis y productos satelitales de estimación de lluvias para obtener una base de datos grillada a nivel nacional de alta resolución espacial (10 Km); facilitando de este modo mayor disponibilidad de los datos de precipitación para su uso en diferentes actividades ligadas al análisis hidrológico con sus limitaciones respectivas.

Los pluviómetros ofrecen una acertada información acerca de la cantidad y la frecuencia de las lluvias . Sin embargo, no posibilitan una adecuada cobertura espacial (Almazroui, 2011; Chappell et al., 2013). La estimación de la distribución espacial de las precipitaciones en el Perú presentan un gran desafío, considerando su compleja orografía y la baja densidad de estaciones pluviométricas sobre todo en la región amazónica (Mantas et al., 2015).

En la actualidad la libre disponibilidad de productos satelitales de estimación de lluvias como el “Tropical Rainfall Measuring Mission”(TRMM), el “National Oceanic and Atmospheric Administration’s Climate Prediction Center morphing technique”(CMORPH), el “Precipitation Estimation from Remotely Sensed Information using Artificial Neural Networks”(PERSIANN) y últimamente el “Global Precipitation Measurement”(GPM) son una alternativa valiosa para mejorar los vacíos de información pluviométrica en muchas partes del mundo. Siendo el campo de los recursos hídricos donde se han desarrollado mayor investigación para evaluar las bondades de estos productos sobre todo para sus aplicaciones en el modelado hidrológico de cuencas, en la predicción de eventos en tiempo real, y la vigilancia de las sequías en zonas de escasa o nula información.(Aybar et al., 2019)

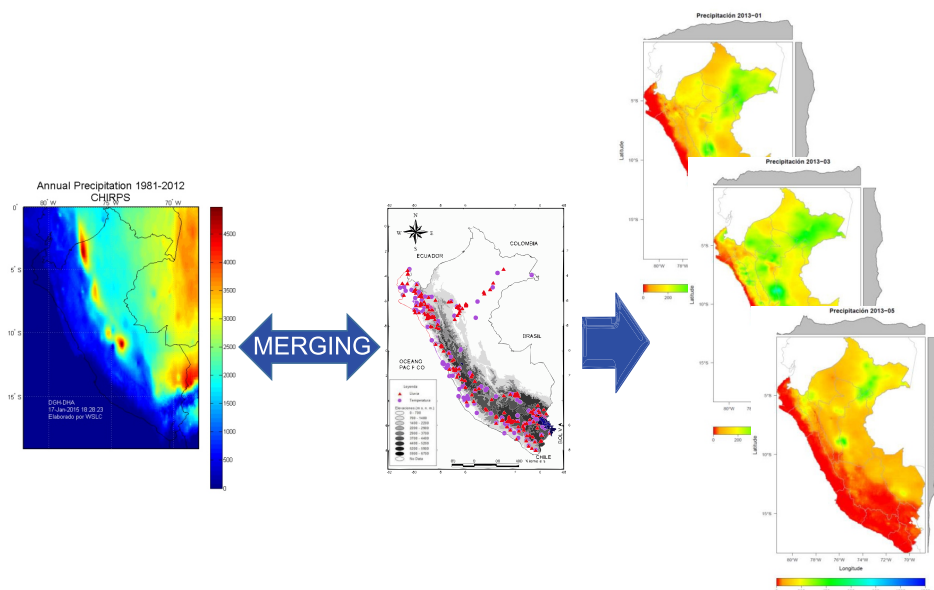


Figura 2.1: Precipitación interpolada PISCO-precipitación.

Fuente: Adaptado de: Generación de datos grillados de precipitación diaria y su utilidad para el monitoreo de inundaciones - Waldo Lavado.

2.2.2.1. Versiones PISCO

PISCO cuenta con cuatro versiones anteriores a la última, actualizada el 21 de marzo del 2019. Las primeras versiones de PISCO precipitación (1.0 y 1.1) se caracterizan por la falta de completación de la serie de datos, lo cual repercute directamente en la generación de quiebres artificiales sobre todo del 2010.

La versión 1.0 sólo genera datos mensuales, los datos de pluviómetros no presentan completación por lo que se evidencia la formación de fuertes quiebres sobre todo a partir del 2010. Esto se debe también a que CHIRPS sólo considera mediciones de pluviómetros para el período de 1981-2010. Actualmente el producto PISCO V1.x no presenta soporte para su continuidad.

Recientemente PISCO genera datos mensuales y diarios, el factor diferenciador frente a las demás versiones radica en el riguroso control de calidad, además para la completación de datos faltantes tanto para las series mensuales como diarias la covariable cambia de CHIRPS a CHIRPM a fin de mejorar la predicción de las intensidades.

Tabla 2.1: Versiones anteriores de PISCO precipitación.

Versión	Covariable	Escala temporal	Método de interpolación	Imputación	Observación	Cobertura temporal
1.0	CHIRPS	Mensual	KED	NO	Fuertes quebres artificiales	1981-2014
1.1	CHIRPS	Mensual y diaria	KED, IDW y RIDW	NO	Fuertes quebres artificiales	1981-2015
1.2	CHIRP	Mensual y diaria	RIDW	SI	Quebres leves artificiales	1981-2016
2.0	CHIRP TRMM2A25	Mensual y diaria	KED y RIDWO	SI	Quebres leves artificiales	1981-2016

Fuente: Uso del Producto Grillado “PISCO” de precipitación en Estudios, Investigaciones y Sistemas Operacionales de Monitoreo y Pronóstico Hidrometeorológico. Nota Técnica 001 SENAMHI-DHI-2017.

2.2.2.2. Precipitación CHIRPS

Climate Hazards Group InfraRed Precipitation With Station data (CHIRPS) es una base de datos de precipitación disponible al público desde 2014, creada y administrada por el U.S. Geological Survey (USGS) y la universidad de california. Con información desde el año 1981 hasta la actualidad y una extensión espacial comprendida entre las latitudes 50°S y 50°N y longitud desde 0° hasta 360°, para la última versión cambió de resolución de 0.05° a 0.1°. Las fuentes de datos utilizados en la creación de CHIRPS fueron: 1)CHPClim(Climatología de los Peligros Climáticos); 2) Infrarrojo (IR) térmico geoestacionario; 3) TRMM (Tropical Rainfall Measuring Mission); 4) Modelo atmosférico de campos de precipitación del sistema de predicción climático de la NOAA (CFSv2); y 5) Observaciones in situ de precipitaciones obtenidas de varias fuentes incluidos servicios meteorológicos estadounidenses y nacionales.

Los productos CHIRP en el paso de tiempo mensual ($CHIRP_m$) y diario ($CHIRP_d$) se calculan inicialmente a partir del producto del paso de tiempo pentad ($CHIRP_{pentad}$) mediante el uso de las siguientes ecuaciones (Funk et al., 2015).

$$IRP_{pentad} = b_0 + b_1 * (TIR CCD_{pentad} \%) \quad (2.2.1)$$

$$CHIRP_{pentad} = CHP_{clim} * \frac{IRP_{pentad}}{IRP_{clim}} \quad (2.2.2)$$

Donde (IRP_{pentad}) es la precipitación calculada a partir del modelo lineal entre el porcentaje de la duración de la nube fría infrarroja térmica $TIR_{CCD}\%$ y el producto $TRMM\ 3B42\ V7$; CHP_{clim} son las climatologías de precipitación mensuales generadas por Funk et al., 2015 e IRP_{clim} representa la climatología de IRP.

Aunque el uso de factores de corrección climáticos o mensuales puede reducir el sesgo sistemático, es crucial que el predictor de agregaciones temporales más grande (por ejemplo, CHP_{clim}) esté bien representado, de lo contrario podría ocurrir un proceso inverso. Para Perú, encontramos que CHP_{clim} sobreestima extremadamente las precipitaciones ($> 500\%$) en la costa peruana entre $8^\circ - 18^\circ S$. Además, no representa adecuadamente los puntos calientes de precipitación orográfica sobre la transición entre los Andes y el Amazonas y considera que los pluviómetros tienen poca confiabilidad. En base a esto, CHP_{clim} fue reemplazado por $PISCO_{pclim}$ de climatología, lo que resultó en CHIRP modificado (CHIRPM)

$$CHIRPM_m = CHIRP_m * \frac{PISCO_{pclim} + \epsilon}{CHP_{clim} + \epsilon} \quad (2.2.3)$$

$$CHIRPM_d = CHIRP_d * \frac{PISCO_{pclim} + \epsilon}{CHP_{clim} + \epsilon} \quad (2.2.4)$$

Donde ϵ es un umbral definido como 0.5 en el denominador y el numerador para tratar con valores de cero o cerca de cero. Esta ecuación se aplica a las estimaciones mensuales y diarias de CHIRP que dan como resultado $CHIRPM_m$ Y $CHIRPM_d$, respectivamente. CHIRP se volvió a muestrear a una resolución espacial de 0.1° mediante interpolación spline cúbica (Aybar et al., 2019).

2.2.2.3. PISCOp climatología (PISCOp clim)

Para Perú, se ha encontrado que el producto de radar de precipitación TRMM 2A25 (TPR, Iguchi et al., 2000) es la fuente de datos de precipitación más adecuada para identificar la variabilidad de la precipitación espacial y los patrones estacionales, incluso para los puntos calientes de precipitación de compleja orografía ubicados en los Andes orientales (Bookhagen & Strecker, 2008; Manz et al., 2016; Nesbitt & Anders, 2009). Sobre la base de este conjunto de datos se construye climatologías mensuales a una resolución espacial de 0.1° . Los datos de

TPR utilizados corresponden al período 1998-2013, excluyendo el año 2014 porque durante ese año el satélite estaba realizando maniobras anómalas relacionadas con su desmantelamiento (Houze et al., 2015). El procedimiento de construcción de PISCOpclim se resume a continuación.

1. Extracción de píxeles sospechosos con una tasa de lluvia $> 500\text{mm/h}$ (Hamada y Takayabu, 2014).
2. La agregación de la totalidad del conjunto de datos de TPR para obtener las estimaciones de las climatologías para cada mes calendario considerando la delineación del píxel de TPR superado propuesto por Manz et al.(2016).
3. Aplicar un filtro de umbral de sesgo espacial para reemplazar los píxeles de grandes proporciones (> 5 medianas) por el promedio de Kernel de 3x3 circundante.
4. Suavizado de la tasa de lluvia a través de la interpolación spline cúbica.
5. Fusionar con el conjunto de datos de pluviómetro de climatologías mensuales a largo plazo (1981-2010) utilizando Kriging ordinario residual (ROK; Sección 2.4.2).

2.2.2.4. Area de Estudio del Producto PISCO

Perú está ubicado en el centro de Sudamérica, entre las latitudes 0°S - 18°S y longitudes 68° - 82°W (figura 2.5), que cubre regiones climáticas extremadamente variables con diversos regímenes de precipitación que resultan de la interacción de las corrientes atmosféricas, la orografía accidentada de los andes, el Sistema de corriente de Humboldt y la Oscilación El Niño (ENSO, Garreaud et al., 2009; Lavado Casimiro et al., 2012)

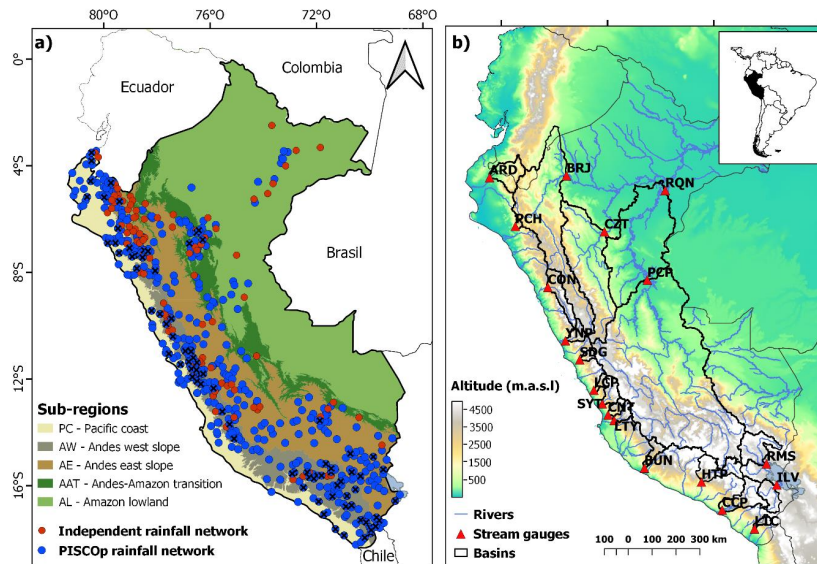


Figura 2.2: a) Los puntos azules y rojos representan PISCOp y red de lluvias independiente. Los puntos en cruz indican estaciones con más de 95% de los datos entre 1981-2016 b) Ubicación de los medidores de flujos seleccionados.

Fuente: Construction of a high-resolution gridded rainfall dataset for Peru from 1981 to the present day.

2.2.2.5. Datos PISCO

El conjunto total de datos comprendía 945 observaciones diarias proporcionadas por SENAMHI. Desde el año 1981- día de hoy. En cuanto al control de calidad de los datos, la mayoría de los métodos en observaciones de pluviómetros están diseñados para redes de estaciones densas (Isotta et al., 2014; Notivoli et al., 2017; Vicente-Serraño et al., 2010) que son difíciles de asumir en este estudio. Resulta complejo asegurar la calidad de los datos en regiones de escaso espacio, debido a un número reducido de estaciones vecinas (Hunziker et al., 2017).

Fueron utilizados alrededor de 432 pluviómetros a nivel nacional, todas estas estaciones fueron sometidas a un riguroso proceso de control de calidad (Inspirados en Hunziker et al., 2017) y completación de datos mediante el método de imputación CUTOFF (Feng et al., 2014).

2.2.2.6. Resultados del producto PISCO

De acuerdo con el enfoque de control de calidad, el 3.51% de los datos totales fueron datos con error general que se eliminaron en los siguientes pasos. Hunziker et al. (2017b) indicaron que los observadores causaron una gran fracción de estos graves errores durante

el registro de datos, mientras que Hunziker et al (2017a) mencionaron que debido a estos errores y una gran cantidad de datos faltantes, el 40% de los pluviómetros disponibles no son apropiados para el análisis del clima. Siguiendo el enfoque y considerando que dentro del período 1981-2016, al menos 10 años de información continua debería estar disponibles después de aplicar el control de calidad, el número de estaciones se redujo de 945 a 441. Estos pluviómetros (la red de precipitación PISCOp) forman la base de información más valiosa para la construcción del conjunto de datos reticulados(Aybar et al., 2019).

La densidad de la red de precipitaciones PISCOp se encuentra alrededor de $282/(10^6 \text{ Km}^2)$, estos resultados sugieren una distribución notablemente heterogénea y condiciones muy dispersas en todo el Perú, muy a pesar de ello, la red de lluvias peruana cuenta con los requisitos mínimos para los análisis hidrológicos definidos por la OMM. Además, la mayoría de los pluviómetros están ubicados en zonas de recarga de montañas, lo cual es una condición importante para la simulación de la lluvia y la escorrentía en las cuencas de drenaje del Pacífico y de los andes. No obstante, la densidad de la red de precipitaciones PISCOp está muy por debajo de los conjuntos de datos climáticos convencionales en todo el mundo (Hofstra et al., 2009).

Tabla 2.2: Resumen del estado y relleno de brechas de la red de precipitaciones PISCOp: BCC(%) es el porcentaje de brechas completadas por CHIRPM con corrección de sesgo, D_n es el promedio espacial de la estadística KS y MK_{bef-af} es el número de tendencias espurias después del procedimiento de llenado de huecos.

		sub-regiones (Total de pluviómetros:441)					
		PC	AW	AE	AAT	AL	TOTAL
	Densidad(/ 10^6 Km^2)	480	754	381	170	59	282
	Error bruto(%)	0.62	7.5	2.19	3.60	1.2	3.51
Mensuales	No datos(%)	34.8	30.94	41.44	45.14	41.72	37.41
	CUTOFF(%)	14.16	11.20	12.49	35.28	40.76	16.40
	BCC(%)	20.64	19.74	28.95	10.05	0.96	21.01
	D_n	0.07	0.05	0.04	0.03	0.02	0.05
Diarios	No datos(%)	32.98	29.39	39.82	43.09	39.40	35.65
	CUTOFF(%)	12.22	13.88	27.04	34.07	33.72	20.56
	BCC(%)	20.76	15.51	12.78	9.02	5.68	15.09
	D_n	0.03	0.03	0.05	0.07	0.03	0.03
	MK_{bef-af}	4	1	7	3	3	18

Fuente: Paper PISCO.

La mayoría de los pluviómetros pertenecientes a la red de lluvia PISCOp se instalaron después del año 2000, lo que explica el alto porcentaje de datos faltantes (34.74%) antes de esta fecha. Por este motivo, la cantidad de datos disponibles para el período 2001-2016 supera en un 117% el período 1981-2000. El enfoque mensual de relleno de huecos basado en estaciones vecinas permitió llenar el 44% del total de datos faltantes. La información adyacente no fue suficiente para crear series de tiempo completas para todos los pluviómetros, por lo que se agregó CHIRPM con corrección de sesgo (Aybar et al., 2019).

2.2.2.7. Novedades PISCO V2.1

- Mediante determinadas ecuaciones se logra pasar del Producto CHIRP a (CHIRPm), producto mensual.
- Se encontró que el producto de radar de precipitación TRMM 2A25 (TPR, Iguchi et al., 2000) es la fuente de datos de precipitación más adecuada para identificar la variabilidad de la precipitación espacial y los patrones estacionales, incluso para los hotspots orográficos complejos ubicados en los Andes orientales (Bookhagen & Strecker, 2008).
- El producto cuadriculado se generó sobre la base de la integración de una serie completa de datos calibrados, datos de CHIRP, climatologías basadas en radares y métodos de interpolación geoestadística y determinística.
- La calidad de PISCOp V2.1 se evaluó en seis subregiones hidrometeorológicas con una red de pluviómetros independiente. Adicionalmente la estimación de la relación de escorrentía dentro de 19 cuencas permitió evaluar el desempeño de PISCOp V2.1 en áreas más extensas.
- Por vez primera, PISCOp V2.1 presenta un exhaustivo estado del conjunto de datos de pluviómetros para el período 1981-2016. Se ha identificado que las brechas en las series de tiempo de lluvia representan el problema más determinante para la construcción de grillas con consistencia temporal.
- El estudio muestra que las combinaciones entre CUTOFF y Q_m son un método conservador y eficiente para completar con éxito la brecha de datos, especialmente para las grandes brechas de datos que prevalecen al comienzo del período PISCOp V2.1. Sin embargo, este método depende en gran medida del predictor y la proximidad de los

pluviómetros. Por lo que se espera que el enfoque aplicado a áreas con baja densidad de estaciones y bajo rendimiento de CHIRPM pueda llevar a resultados insatisfactorios.

- La evaluación independiente y el balance hídrico confirman que PISCOp V2.1 es el producto adecuado para representar las estimaciones de precipitaciones en el área. Además, observamos que la corrección climatológica basada en PISCOp_{clim} mejoró significativamente los resultados en comparación con CHP_{clim}.
- Aunque parece muy atractivo utilizar datos en cuadrícula con cobertura espacial y temporal completa, PISCOp V2.1 presenta inhomogeneidades, por lo que recomiendan a los usuarios un cuidado especial para el análisis de tendencias, eventos extremos, cambio climático u otras aplicaciones.
- Se han planificado nuevas versiones de PISCOp y se espera que hagan uso de las nuevas fuentes de información existentes, como IMERG (Huffman et al., 2015), pluviómetros transfronterizos, así como la mejora del llenado de datos de la serie temporal de lluvias.

2.2.3. Índice de Precipitación Estandarizado (SPI)

El SPI fue recomendado por Guttman(1999) y Propuesto por (McKee et al., 1993), popularizado debido a su planteamiento teórico y por usar sólo el registro mensual de precipitaciones preferentemente con más de 30 años de registro histórico (Campos, 2014)

La organización Meteorológica Mundial (OMM), menciona que a lo largo de los años se han debatido mucho sobre que índices deberían utilizarse en determinados climas, al mismo que se han elaborado muchas definiciones e índices de sequía, teniendo en cuenta ello, la universidad de Nebraska-Lincoln (EEUU) en conjunto con la OMM organizaron del 8 al 11 de diciembre del 2009 el curso internacional sobre índices y sistemas de alerta temprana de sequías, uno de los resultados fue la ratificación del Índice de Precipitación Estandarizada (SPI), además de desarrollar una guía recomendando la utilización del (SPI), uno de los más utilizados en más de 70 países.

El SPI, por sus siglas en inglés, se ajusta a una distribución normal, por lo que puede ser utilizado para monitorear tanto los períodos húmedos como los períodos secos (Tsakiris et al., 2007). El SPI ha sido extensamente utilizado porque puede ser calculado para

una variedad de escalas temporales de manera relativamente sencilla. Esta versatilidad le permite al SPI ser usado indistintamente para monitorear las provisiones de agua a corto plazo, como es el caso de la humedad del suelo. la cual es importante para la producción agrícola y los recursos hídricos a largo plazo, tales como el agua subterránea, el caudal y los niveles de lagos y reservorios (McKee et al., 1993)

Por las razones mencionadas anteriormente y a pesar de ser un índice relativamente reciente, el SPI ha sido usado en diferentes estudios y en diferentes partes del mundo. En el presente estudio utilizaremos el SPI obtenido del repositorio PISCO-SENAMHI para la evaluación de la cuenca del Mantaro, principalmente por el requerimiento mínimo de datos (sólo precipitación) y por ser un índice comparable en distintas cuencas.

Aplicaciones: La posibilidad de calcular el SPI para distintas escalas temporales ofrece numerosas aplicaciones. En función del efecto de la sequía en cuestión, los valores del SPI correspondientes a 3 meses o inferior podrían ser utilizados para una labor básica de vigilancia de sequías; los valores para un período de 6 meses o inferior, para vigilar los efectos de la agricultura, y los valores para un período de 12 meses a más, para efectos hidrológicos.

Puntos a favor:

- El mayor punto a favor del SPI es que sólo se necesita datos de precipitación, por lo que es fácil de usar y calcular.
- El SPI se puede aplicar a todos los regímenes climáticos y se puede comparar los valores del SPI de climas diferentes.
- La posibilidad de calcular el SPI para períodos cortos de registro que comprenden datos ausentes, también resulta valiosa para regiones que pueden tener escasez de datos o carecer de conjuntos coherentes de datos a largo plazo.
- La posibilidad de calcular el SPI durante varias escalas temporales propicia que el índice tenga una gran variedad de aplicaciones.

Puntos en contra:

- Dado que el único dato de entrada es la precipitación, el SPI no tiene en cuenta el componente de la temperatura, que es de importancia para el balance hídrico general y el uso del agua de una región. Este inconveniente puede dificultar la comparación de episodios con valores del SPI similares pero distintas condiciones térmicas.
- La posibilidad de calcular el SPI para períodos cortos de registro, o a partir de datos con valores ausentes, también puede dar lugar a un uso indebido del producto, puesto que el programa generará un producto independientemente de los datos de entrada introducidos.(Svoboda et al., 2016).

El SPI se calcula utilizando la ecuación 2.2.5 y se clasifica en función a la tabla 2.3, según lo propuesto por (McKee et al., 1993). la distribución gamma se define como:

$$g(x) = \frac{x^{\alpha-1} \cdot e^{-\frac{x}{\beta}}}{\beta^{\alpha} \cdot \Gamma(\alpha)} \text{ para } x > 0 \quad (2.2.5)$$

Donde x es la variable o precipitación mensual, α y β son los parámetros de forma y escala respectivamente de la distribución Gamma. $\Gamma(\alpha)$ es la función Gamma definida por la integral:

$$\Gamma(\alpha) = \lim_{n \rightarrow \infty} \prod_{v=0}^{n-1} \frac{n! n^{y-1}}{y+v} \equiv \int_0^{\infty} y^{\alpha-1} e^{-y} dy \quad (2.2.6)$$

La función Gamma es evaluado numéricamente tomando el parámetro α . Es necesario estimar los dos parámetros con el fin de modelar los datos observados con una función de densidad Gamma distribuido. Edwars y McKee(1997) usan las aproximación:

$$\alpha = \frac{1 + \sqrt{1 + 4A/3}}{4A} \quad (2.2.7)$$

$$\beta = \frac{\bar{x}}{\alpha} \quad (2.2.8)$$

Donde A es una variable auxiliar

$$A = \ln(\bar{x}) - \frac{\sum_{i=1}^{nn} \ln(x_i)}{nn} \quad (2.2.9)$$

Donde nn , es el número de datos no nulos de la serie x_i , cuya media aritmética es \bar{x} . Luego

de estimar los parámetros α y β , la función de densidad de probabilidad $g(x)$... es integrado con respecto a 'x' y se obtiene la función de distribución acumulada $G(x)$

$$G(x) = \int_0^x g(x)dx = \frac{1}{\beta^\alpha \Gamma(\alpha)} \int_0^x x^{\alpha-1} e^{-\frac{x}{\beta}} dx \quad (2.2.10)$$

Haciendo $t = x/\beta$, la ecuación se convierte en una función de distribución acumulada incompleta:

$$G(x) = \frac{1}{\Gamma(\alpha)} \int_0^x t^{\alpha-1} e^{-t} dt \quad (2.2.11)$$

Como se puede observar, $G(x)$ no es válida para precipitaciones igual a cero ($x_i=0$), es así que se toma en cuenta la probabilidad de tener valores nulos 'q' y la probabilidad de no tenerlos $p=1-q$, de tal manera se obtenga la función de distribución acumulada completa $H(x)$ y se evalúa la probabilidad de no tener excedencia de un valor x . Su expresión es:

$$H(x) = q + (1 - q)G(x) \quad (2.2.12)$$

Edwards y Mckee (1997), presentan una solución aproximada, utilizando la técnica de conversión desarrollado en Abramowitz y Stegun (1965) que convierte la probabilidad acumulada en una variable estándar Z . Entonces, el índice SPI se define como:

$$Z = SPI = - \left(t - \frac{c_0 + c_1 t + c_2 t^2}{1 + d_1 t + d_2 t^2 + d_3 t^3} \right) \quad \text{para } 0 < H(x) \leq 0.5 \quad (2.2.13)$$

$$Z = SPI = + \left(t - \frac{c_0 + c_1 t + c_2 t^2}{1 + d_1 t + d_2 t^2 + d_3 t^3} \right) \quad \text{para } 0.5 < H(x) \leq 1 \quad (2.2.14)$$

donde:

$$t = \sqrt{\ln \left[\frac{1}{(H(x))^2} \right]} \quad \text{para } 0 < H(x) \leq 0.5 \quad (2.2.15)$$

y

$$t = \sqrt{\ln \left[\frac{1}{(1 - H(x))^2} \right]} \quad \text{para } 0.5 < H(x) \leq 1 \quad (2.2.16)$$

y por último las constantes son:

$$c_0=2.515517 \quad c_1=0.802853 \quad c_2=0.010328$$

$$d_0=1.432788 \quad d_1=0.189269 \quad d_2=0.001308$$

(McKee et al., 1993), implementaron la clasificación de las sequías de acuerdo a los resultados de los SPI, según muestra la siguiente tabla:

Tabla 2.3: Valores del Índice de Precipitación Estandarizado.

Tipo de Sequía	SPI
Extremadamente Seco	$SPI \leq -2.0$
Severamente seco	$-2 < SPI \leq -1.5$
Moderadamente seco	$-1.5 < SPI \leq -1.0$
Normal o aprox. normal	$-1.0 < SPI < 1.0$
Moderadamente húmedo	$1.0 \leq SPI < 1.5$
Muy húmedo	$1.5 \leq SPI < 2.0$
Extremadamente húmedo	$SPI \geq 2.0$

Fuente: Adaptado de OMM.

BASADOS EN MONITOREO REMOTO

2.2.4. Índice de Vegetación de Diferencia Normalizada (NDVI)

El índice de vegetación más conocido y usado es el Índice de Vegetación de Diferencia Normalizada (NDVI). Este índice fue introducido con el objetivo de separar la vegetación del brillo que produce el suelo (Rouse et al., 1974).

Este índice utilizado para detectar y vigilar sequías agrícolas, se basa en el peculiar comportamiento radiométrico de la vegetación, relacionado con la actividad fotosintética y la estructura foliar de las plantas, permitiendo determinar la vigorosidad de la planta.

Para determinar la densidad del verde en un trozo de tierra, los investigadores deben observar los distintos colores (longitudes de onda) de la luz solar visible e infrarroja cercana reflejada por las plantas. Como se puede ver a través de un prisma, muchas longitudes de onda diferentes conforman el espectro de la luz solar. Cuando la luz del sol incide sobre los objetos, se absorben ciertas longitudes de onda de este espectro y se reflejan otras longitudes de onda. El pigmento en las hojas de las plantas, la clorofila, absorbe fuertemente la luz visible (de 0.4 a 0.7 μm) para uso en la fotosíntesis. La estructura celular de las hojas, por otro lado, refleja fuertemente la luz del infrarrojo cercano (de 0.7 a 1.1 μm). Cuantas más hojas tiene

una planta, más se ven afectadas estas longitudes de onda de luz, respectivamente (European Space Agency, 2014).

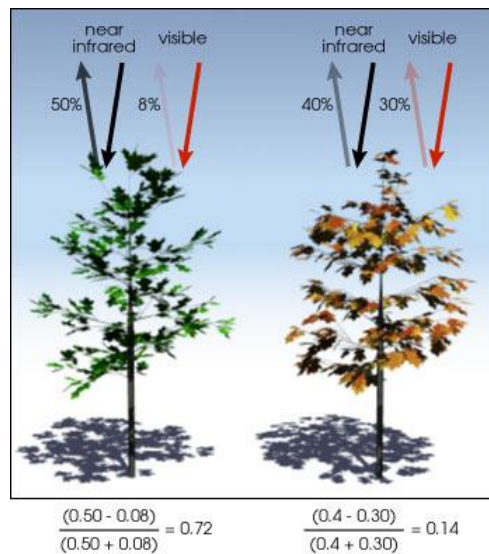


Figura 2.3: Características del NDVI de una planta sana y enferma .

Fuente: Adaptado de Earth Observatory (NASA)

Mientras que en el visible los pigmentos de la hoja absorben la mayor parte de la energía que reciben, en el NIR, las paredes celulares de las hojas, que se encuentran llenas de agua, reflejan la mayor cantidad de energía. En contraste, cuando la vegetación sufre algún tipo de estrés, ya sea por presencia de plagas o por sequía, la cantidad de agua disminuye en las paredes celulares por lo que la reflectividad disminuye en el NIR y aumenta paralelamente en el rojo al tener menor absorción clorofílica. Esta diferencia en la respuesta espectral permite separar con relativa facilidad la vegetación sana de otras cubiertas.

El cálculo del NDVI implica el uso de una simple fórmula con dos bandas, el Infrarrojo Cercano (NIR) y el rojo (RED)

$$NDVI = \frac{(\rho S_{NIR} - \rho S_{RED})}{(\rho S_{NIR} + \rho S_{RED})} \quad (2.2.17)$$

Donde:

ρS_{NIR} : Reflectancia de banda Infrarroja cercana-NIR.

ρS_{RED} : Reflectancia de la banda roja-RED.

Los cálculos de NDVI para un píxel dado siempre dan como resultado un número que varía de menos uno (-1) a mas uno (+1); sin embargo, ninguna hoja verde da un valor cercano

a cero. Un cero significa que no hay vegetación y cerca de +1 (0.8 - 0.9) indica la mayor densidad posible de hojas verdes.

Tabla 2.4: Cálculo y valores de NDVI.

Descripción	VALOR NDVI
Material Inanimado, muerto (carreteras, plantas muertas)	NDVI <0
Material vegetativo no saludable	$0 < \text{NDVI} \leq 0.33$
Material vegetativo sano	$0.33 < \text{NDVI} \leq 0.66$
Material vegetal muy saludable	NDVI >0.66

Fuente: Adaptado de Earth Observatory (NASA).

2.2.4.1. NDVI como indicador de sequía

Los sensores remotos satelitales pueden cuantificar qué fracción de la radiación fotosintéticamente activa es absorbida por la vegetación. A fines de la década de 1970, los científicos descubrieron que la fotosíntesis neta está directamente relacionada con la cantidad de radiación fotosintéticamente activa que absorben las plantas. En resumen, cuanto más absorbe una planta la luz solar visible (durante la estación de crecimiento), más fotosintetiza y más productiva es. A la inversa, cuanto menos luz solar absorbe la planta, menos fotosintetiza y menos productiva es. Cualquiera de los dos escenarios da como resultado un NDVI que a lo largo del tiempo, puede promediarse para establecer las condiciones de crecimiento “normales” para la vegetación en una región determinada y para una época determinada del año (Anomalía). En resumen, la absorción y el reflejo de la radiación fotosintéticamente activa de una región durante un período de tiempo determinado se pueden utilizar para caracterizar la salud de la vegetación allí, en relación con la norma. (Earth Observatory - NASA, 2000)

ANOMALIAS: La diferencia entre el NDVI promedio para un mes en particular de un año dado y el NDVI promedio para el mismo mes en los últimos 15 años se llama anomalía del NDVI. En la mayoría de los climas, el crecimiento de la vegetación está limitado por el agua, por lo que la densidad relativa de la vegetación es un buen indicador de la sequía agrícola.

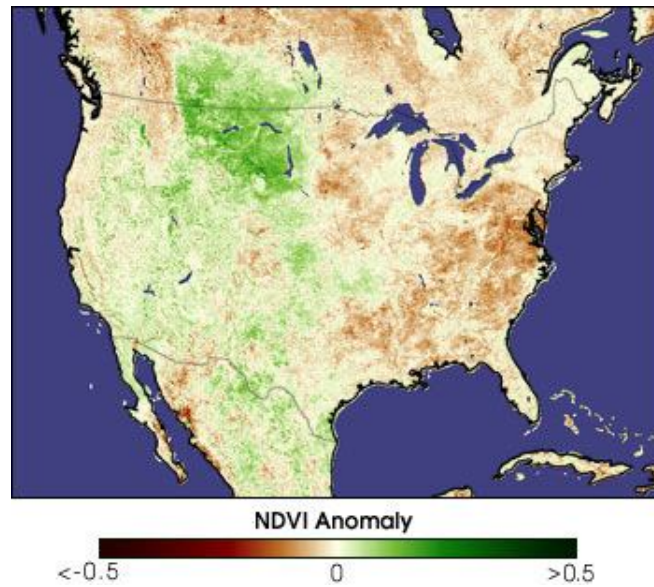


Figura 2.4: Anomalía del NDVI en los EE.UU. en agosto de 1993.

Fuente: Adaptado de Earth Observatory (NASA)

2.2.5. Índice de Condición de Vegetación (VCI)

El índice VCI es utilizado para la evaluación, monitoreo y la evaluación de la cobertura vegetal. Por ende, aplicado para la evaluación de sequías agrícolas, a través de la escala 0 a 1, siendo 0 la condición extremadamente mala y el valor de 1 indica condiciones óptimas (Kogan y Sullivan, 1993).

$$VCI_i = \frac{VI_i - VI_{min}}{VI_{max} - VI_{min}} \quad (2.2.18)$$

En donde, el VCI es el índice de de condición de vegetación y el VI es el índice de vegetación, VI_{min} , VI_{max} son los mínimos y máximos calculados por los pixeles correspondientes de cada mes de análisis. El índice de vegetación (VI), puede tomar tanto valores del NDVI como del EVI. En la presente investigación se utilizará valores del índice de vegetación mejorada (EVI), el cual se calcula mediante la ecuación siguiente:

$$EVI = G * \frac{(\rho_{S_{NIR}} - \rho_{S_{RED}})}{(\rho_{S_{NIR}} + C_1 \rho_{S_{RED}} - C_2 \rho_{S_{BLUE}} + L)} \quad (2.2.19)$$

Donde:

$\rho_{S_{NIR}}$: Reflectancia de banda Infrarroja cercana - NIR.

$\rho_{S_{RED}}$: Reflectancia de la banda roja - RED.

ρ_{BLUE} : Reflectancia de la banda azul - BLUE.

L : Ajuste del fondo del dosel, siendo L=1

G : Factor de ganancia, siendo G=2.5

C_1 : Coeficientes de resistencia de aerosoles, siendo $C_1=6$

C_2 : Coeficientes de resistencia de aerosoles, siendo $C_2=7.5$

Distintos estudios dan resultados de la validación del VCI, demostrando tener una excelente capacidad de detectar sequías, la medición en el tiempo de su aparición, duración, intensidad y el impacto sobre la vegetación (Kogan,1995)

Tabla 2.5: Clasificación de sequías según los VCI.

Clasificación	VCI
Humedad Extrema	0.90 a 1.00
Humedad Severa	0.80 a 0.90
Humedad Moderada	0.60 a 0.80
Humedad Leve	0.50 a 0.60
No sequía	0.40 a 0.50
Sequía Leve	0.30 a 0.40
Sequía Moderada	0.20 a 0.30
Sequía Severa	0.10 a 0.20
Sequía Extrema	<0.1

Fuente: Adaptado del IRI - International Research Institute for Climate and Society.

Los métodos tradicionales de evaluación y monitoreo de sequías se basan en datos de lluvias. Sin embargo, este enfoque tiene dos desventajas principales: los datos de lluvia se limitan a la región y a menudo son inexactos y difíciles de obtener casi en tiempo real. Por el contrario, los datos del sensor satelital están continuamente disponibles y pueden utilizarse para detectar el inicio de una sequía, su duración y magnitud.

2.2.6. Índice de Humedad de Diferencia Normalizada (NDMI)

Modificado por Clevers en 1988, este índice se utiliza para medir la cantidad de agua que posee la vegetación o el nivel de saturación de humedad que posee el suelo. Los valores que se obtienen oscilan entre -1 y 1, para zonas con menor humedad (Muñoz Aguayo, 2015).

De similar característica a la metodología del NDVI, pero utilizan el canal cerca del infrarrojo para vigilar el contenido de agua de la cobertura vegetal. Los cambios en la cubierta vegetal

se utilizan para detectar períodos de estrés ocasionados por la sequía. Utilizados para vigilar la sequía que afecta a la agricultura como método de detección del estrés (Svoboda et al., 2016).

$$NDMI = \frac{(\rho_{S_{NIR}} - \rho_{S_{SWIR}})}{(\rho_{S_{NIR}} + \rho_{S_{SWIR}})} \quad (2.2.20)$$

Donde:

$\rho_{S_{NIR}}$: Reflectancia de banda Infrarroja cercana- NIR.

$\rho_{S_{SWIR}}$: Reflectancia de la banda infrarrojo medio- SWIR.

El NDMI dado que trabaja con la fuente de datos del sensor MODIS, es un índice independiente. Fundamentado en la diferencia normalizada de las radiaciones de onda corta, su principio es distinto al SPI trabajado anteriormente, por lo que su estimación se realizó en promedios i de 1 mes, como es trabajado en la mayoría de estudios que trabajan con este índice. La detección con este índice se realizó mediante la búsqueda de valores $NDMI \leq -0.67$, buscando tener una equivalencia al rango de -2 utilizado en el SPI. también se tiene en cuenta el criterio $NDMI \leq -0.1$, dato por (Bajgain et al., 2015), ya que encontraron buen desempeño al utilizarlo. la escala de rangos se muestra a continuación en la siguiente tabla 2.6.

Tabla 2.6: Clases de Sequías para valores del NDMI.

Clase de Sequía	Descripción	Valores NDMI
0	no-sequía	
D0	anormalmente seco	$NDMI \geq 0.1$
D1	sequía moderada	$0 < NDMI \leq 0.1$
D2	sequía severa	$-0.1 < NDMI \leq 0$
D3	sequía extrema	
D4	sequía excepcional	$NDMI \leq -0.1$

Fuente: Extraída de (Bajgain, Xiao, Wagle, Basara, & Zhou, 2015).

2.3. Marco Conceptual

2.3.1. Sequías

2.3.1.1. Definición de Sequías

No se tiene una definición exacta y universalmente aceptable sobre la sequía debido a la naturaleza compleja del fenómeno, con diferentes definiciones según la disciplina desde la que se quiere abordar el fenómeno. Así algunas de las definiciones:



Figura 2.5: Campos de maíz dañados por la sequía, Distritos de Chiara y Socos - nov 2018.

Fuente: Diario Jornada.

El centro de mitigación de sequías de los Estados Unidos considera en términos generales que la sequía se origina de un déficit en las precipitaciones sobre un período de tiempo extendido, usualmente una estación o más, resultando en la escasez de agua para alguna actividad, grupo o sector ambiental.

La Organización Meteorológica Mundial (OMM) define; la sequía es una desviación acumulativa respecto de las condiciones normales o previstas de precipitación, es decir, respecto de una media estadística o de un promedio a largo plazo. Este déficit de precipitación puede sobrevenir en poco tiempo o tardar meses en manifestarse a través de la disminución del caudal de los ríos, de los niveles de los embalses o de la altura de las aguas subterráneas (Organización Meteorológica Mundial, 2006).

La convención de las Naciones Unidas de Lucha Contra la Desertificación (CNULD), define la sequía como un fenómeno natural del clima, causado por el déficit de la precipitación en condiciones considerablemente inferior a los niveles normales registrados, causando un agudo desequilibrio hídrico que perjudica los sistemas de producción del recurso tierra (CNULD, 1994).

Es importante diferenciar entre definiciones conceptuales y operacionales de sequía (Wilhite and Glantz, 1985). Las definiciones conceptuales se formulan en términos generales para una comprensión global y establecimiento de políticas sobre sequías. Definiciones operacionales de sequía (por ejemplo, Agrícola o hidrológico) definen objetivamente los criterios sobre el inicio y fin de la sequía y severidad para una aplicación específica.

La sequía es un fenómeno natural que se extiende de manera irregular a través del tiempo y el espacio, tiene la particularidad de ser de lento desarrollo temporal y amplia cobertura espacial, su ocurrencia no provoca el colapso ni la falla destructiva de la infraestructura. Sin embargo, puede condicionar las operaciones de los sistemas de recursos hídricos imponiendo muchas veces condiciones más exigentes que las de diseño con graves consecuencias económicas y sociales (Fernández, 1997).

Los impactos de las sequías generalmente se acumulan de forma gradual durante períodos de tiempo extensos, pudiendo durar incluso años después de que el evento haya terminado dificultando la determinación del inicio y el fin del evento. Los impactos de las sequías son de carácter no destructivos y se producen sobre áreas extensas, en comparación con los impactos causados por otros desastres naturales, por los que es complicado cuantificar sus efectos (Gálvez, 2017).

2.3.1.2. Tipos de Sequías

(Wilhite and Glantz, 1985) agruparon diversas definiciones de sequías, en cuatro grupos según la disciplina científica desde la cual se analiza el fenómeno: Sequía meteorológica, agrícola, hidrológica y socioeconómica. La secuencia se inicia con la sequía meteorológica y una condición seca persistente puede inducir a sequías agrícolas, hidrológicas y de recursos hídricos (Andreadis et al., 2015; Vidal and Wade, 2009).

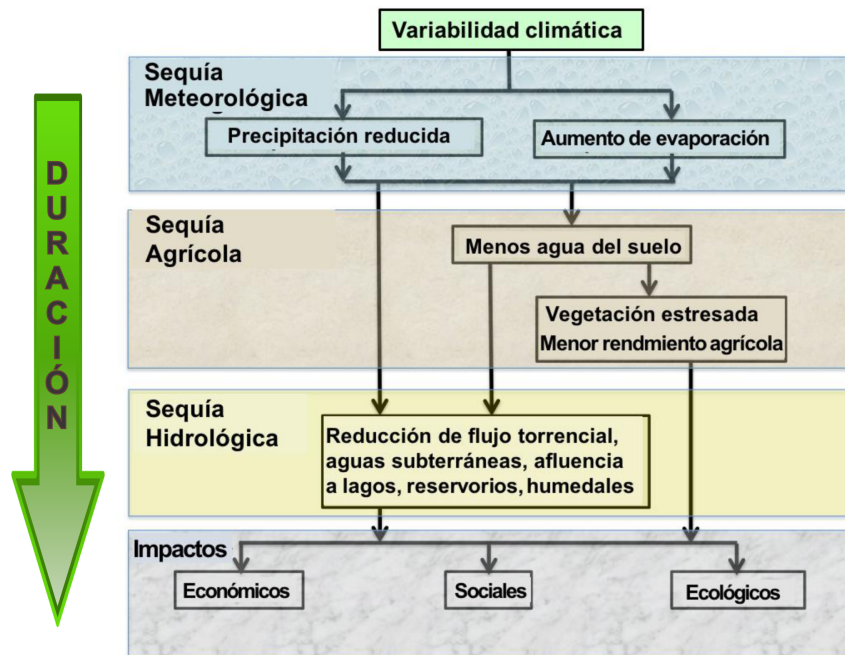


Figura 2.6: Tipos de Sequías.

Fuente: National Aeronautics and Space Administration

Sequía Meteorológica

Relacionada con la disminución de las precipitaciones y determinada mediante la comparación entre la precipitación del periodo de análisis y un indicador estadístico de la serie temporal que generalmente es la media. Existen diversas definiciones de sequía meteorológica desarrolladas para regiones específicas, debido a que las variaciones en los regímenes de precipitación tienen una fuerte influencia de las características de cada región (Wilhite and Glantz, 1985).

Sequía Agrícola

Relacionada con varias condiciones como la falta de precipitación, la evapotranspiración y el impacto agrícola. Expresada en función a la deficiencia de humedad en el suelo disponible para las plantas, en muchos casos valorada de acuerdo a los daños provocados sobre la producción agrícola. Debido a que la cantidad necesaria para cada cultivo es distinta y varía a lo largo de las fases de crecimiento, es complejo definir umbrales de sequía incluso para una misma región. Este tipo de sequía no solo depende de las condiciones meteorológicas, sino también de las características biológicas del cultivo y las propiedades del suelo. En cuanto los niveles de humedad del suelo sean suficientes para sustentar el crecimiento de un determinado

cultivo durante el período que se presente la sequía meteorológica, la sequía agrícola no se producirá (Wilhite and Glantz, 1985).

Sequía Hidrológica

Relacionada con la deficiencia de almacenamiento de volúmenes de aguas superficiales y subterráneas. Las sequías hidrológicas tienen un desfase entre la ocurrencia de las sequías meteorológicas o agrícolas, ya que requiere de un tiempo la propagación de las anomalías pluviométricas a los diversos componentes del ciclo hidrológico (Wilhite and Glantz, 1985).

A diferencia de la sequía agrícola que tiene lugar al poco tiempo de presentarse la sequía meteorológica, la sequía hidrológica puede tardar de meses a años dependiendo de la región desde el inicio de la sequía meteorológica; y si las lluvias retornan en poco tiempo, la sequía hidrológica no llegará a manifestarse.

Sequía Socio económica

Producida cuando la disponibilidad del recurso hídrico disminuye hasta el punto de generar daños económicos o sociales sobre poblaciones de zonas afectadas por la escasez de precipitaciones (Wilhite and Glantz, 1985).

2.3.2. Enfoques de Vigilancia de la Sequía

Hay tres métodos básicos para vigilar, orientar la alerta temprana y evaluar las sequías.

1. Utilizar un único indicador o índice.
2. Utilizar varios indicadores o índices.
3. Utilizar indicadores mixtos o híbridos.

En el pasado, las instancias decisorias y los científicos utilizaban un solo indicador o índice porque era el único criterio que tenían a su disposición, o porque tenían poco tiempo para obtener datos y calcular índices derivados u otros resultados concretos. Durante los últimos 20 años, aproximadamente, ha habido un decidido interés general y una proliferación de nuevos índices basados en varios indicadores que son compatibles con distintas aplicaciones y escalas, tanto espaciales como temporales. Estos nuevos instrumentos han dotado de más alternativas a las instancias decisorias y normativas, las cuales carecían hasta hace

poco tiempo de un método preciso para sintetizar los resultados en un mensaje sencillo que se pudiera transmitir a la población. La aparición de los sistemas de información geográfico (SIG) y la expansión de los recursos informáticos y de presentación de datos han incrementado la capacidad de superponer y comparar varios indicadores o índices, así como elaborar mapas sobre ellos (Organización Meteorológica Mundial, 2012).

Pueden producirse confusiones al intentar establecer los indicadores o índices que se utilizarán, sobre todo si están vinculados a un plan integral contra la sequía y se utilizan como elementos desencadenantes de medidas de gestión de sequías. A fin de establecer el ajuste óptimo para una localización o cuenca, hace falta tiempo y un sistema de prueba-error. De la misma forma que no hay una definición única de sequía, no hay ningún índice o indicador que pueda atribuirse y ser aplicado a todos los tipos de sequía, regímenes Climáticos y sectores afectados por la sequía (Svoboda et al., 2016).

2.3.3. Caracterización de Sequías

Para la caracterización(García, 2008) toma en cuenta la teoría de sucesiones propuesta por (Yevjevich, 1967). Esta teoría analiza las sequías teniendo en cuenta los procesos espacio-temporales que considera la oferta y la demanda del recurso hídrico en una región.

La teoría de la sucesiones permite caracterizar eventos secos en base a tres características principales: magnitud, duración y área afectada (Lacruz, 2012).

2.3.3.1. Severidad de la sequía

Indica el déficit de volumen acumulado, definido como la suma de los déficits de volumen generados durante una secuencia ininterrumpida de meses que delimitan un evento de sequía expresado como déficits acumulados en unidades estandarizadas.

2.3.3.2. Intensidad de la sequía

Existe un parámetro muy utilizado en la caracterización de sequías que viene a ser la intensidad. Definida por algunos autores como el máximo valor del déficit ocurrido durante el evento, conocido como intensidad máxima.

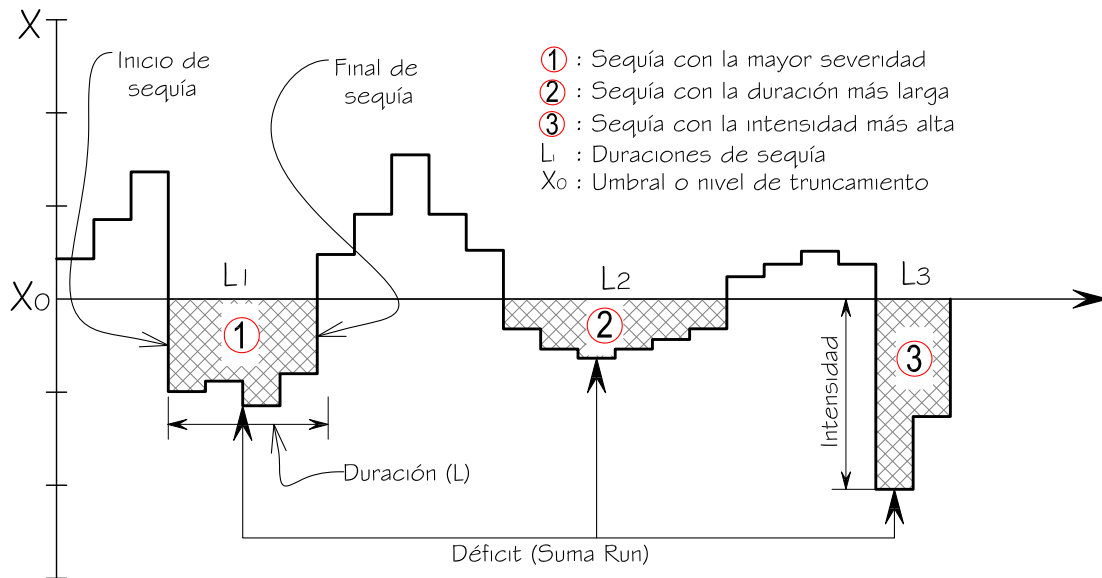


Figura 2.7: Caracterización de la sequía.

Fuente: Adaptado desde Mishra y Singh (2010)

2.3.3.3. Duración de la sequía

La duración de un evento de sequía dado se define como el periodo consecutivo e ininterrumpido de meses que dura un evento de sequía, registrado en un periodo de tiempo relativamente largo. Dependiendo de la región, la duración puede variar de meses o hasta incluso convertirse en una sequía multianual.

2.3.4. Sistemas de alerta temprana de la sequía

Por lo general, los sistemas de alerta temprana de la sequía tienen por objeto seguir y evaluar las condiciones y tendencias climáticas, hidrológicas e hídricas, y suministrar información pertinente al respecto. En teoría, presentan un componente de vigilancia (que comprende los efectos) y un componente de predicción. La finalidad es proporcionar información puntual antes de la fase incipiente de la sequía, o durante ella, para adoptar medidas (por medio de elementos desencadenantes que tienen un umbral como referencia) en el marco de un plan de gestión de riesgos de sequía que sirva de medio para reducir los posibles efectos. Es esencial contar con un enfoque exhaustivo e integrado para vigilar este peligro de lenta aparición (Svoboda et al., 2016).

2.3.5. Índices de Sequías

Los índices de sequías son reconocidos como el pilar de los sistemas de monitoreo y alerta temprana de sequías. Es importante definir qué son los indicadores e índices de sequía.

Indicadores. Son variables o parámetros utilizados para describir las condiciones de las sequías. Cabe citar, por ejemplo, la precipitación, temperatura, los caudales fluviales, los niveles de las aguas subterráneas y de los embalses, la humedad del suelo y el manto de nieve.

Índices. Suelen ser representaciones numéricas informantes de la gravedad de las sequías, determinadas mediante datos climáticos o hidrológicos. Tienen por objeto analizar el estado cualitativo de las sequías en el entorno en un período de tiempo determinado. Desde el punto de vista técnico, los índices también son indicadores. Se utilizan para proporcionar un estudio cuantitativo de la gravedad, la localización, el desarrollo cronológico y la duración de los episodios de sequía. La gravedad se refiere a la desviación de la normalidad de un índice (Svoboda et al., 2016).

Un índice de sequía proporciona un cuadro completo para el análisis de la sequía y la toma de decisiones que es más fácil de usar en comparación con los datos brutos de los indicadores (Hayes, 2006). Se han desarrollado más de 150 índices de sequía (Niemeyer, 2008) y recientemente se han propuesto índices adicionales (Vasiliades et al., 2011; Vicente-Serrano et al., 2010).

Utilidades de los índices en la caracterización de sequías:

- Permite reconocer los períodos húmedos de corta duración, dentro de las sequías de larga duración o los períodos secos de corta duración dentro de períodos húmedos de larga duración.
- Detección de sequías y monitoreo en tiempo real (Niemeyer, 2008).
- Declaración del comienzo y final de un período de sequía (Tsakiris et al., 2007)
- Permitir a los gestores de sequía declarar los niveles de sequía y proporcionar medidas de respuesta a la sequía.
- Representar el concepto de sequía en una región (Tsakiris et al., 2007)

- Facilitar la comunicación de las condiciones de sequía entre las diversas entidades interesadas.

Mundialmente son dos los índices más utilizados: el Índice de Severidad de Sequías de Palmer (PDSI por sus siglas en inglés; Palmer, 1965) y el Índice de Precipitación Estandarizado (SPI por sus siglas en inglés; Mckee et al., 1993).

2.3.6. Satélite TERRA - EOS AM-1

Terra (EOS AM-1) es un satélite multinacional de la NASA de investigación científica por satélite. Funciona en una órbita polar alrededor de la Tierra sincronizada con el Sol. Esto significa que recorre una trayectoria que pasa por ambos polos caracterizada por aparecer cada día sobre un punto dado del ecuador siempre a la misma hora local. El nombre de “Terra” viene del latín y significa tierra. El satélite fue lanzado desde Vandenberg Air Force Base el 18 de diciembre de 1999, a bordo de un vehículo Atlas IAS y comenzó a recoger datos el 24 de febrero de 2000. Terra lleva una carga útil de cinco sensores remotos destinados a supervisar el estado de la Tierra, del medio ambiente y los cambios climáticos (Mas, 2011).

Los sensores son:

- ASTER L1T (espectral avanzado de emisiones térmicas y reflexión Radiométrica)
- CERES (nubes y la Tierra, energía radiante del sistema)
- MISR (multiángulo de imágenes espectralradiométricas)
- MODIS (Moderate-Resolution Imaging Spectroradiometer)
- MOPITT (mediciones de la contaminación en la tropósfera)

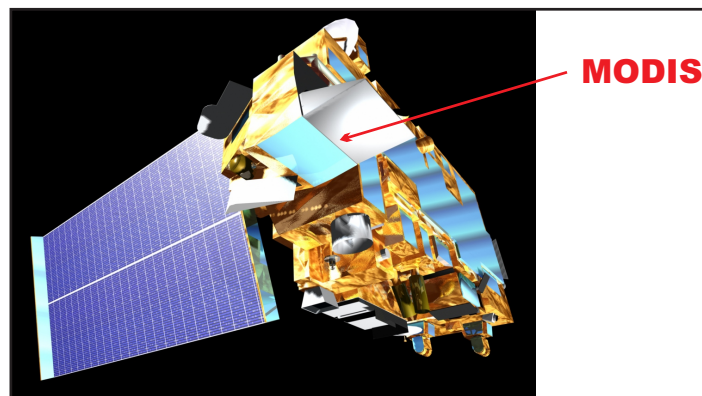


Figura 2.8: Satélite TERRA y ubicación de sensor MODIS.

Fuente: Adaptado de la USGS.

2.3.6.1. Sensor MODIS

El sensor MODIS (Moderate Resolution Imaging Spectroradiometer), es un instrumento que viaja a bordo de los satélites: TERRA (EOS a.m.) y AQUA (EOS p.m.). La órbita del satélite TERRA alrededor de la tierra va de norte a sur cruzando el Ecuador por la mañana, mientras que el satélite AQUA va de sur a norte cruzando el Ecuador por la tarde. El sensor forma parte de la misión EOS (Sistema de Observación de la Tierra) de la NASA, fue creado para capturar imágenes de la atmósfera, océano y superficie, transmitiendo datos en 36 bandas, que van desde el espectro visible hasta el infra-rojo térmico, con resoluciones espaciales de 250, 500 y 1000 metros (Mas, 2011).

Características

- Altitud de órbita: 708Km (TERRA), 705Km (AQUA)
- Resolución Radiométrica: 12 bits
- Resolución Espacial: 250m(B1-2), 500m(B3-7), 1000m(B6-36)
- Resolución temporal: 8 días, 16 días, 1 mes.
- Tamaño de la imagen: 2330km x 10km

2.3.6.2. Productos MODIS

Producto	Plataforma	Resolución espectral	Resolución espacial	Resolución temporal	Rango Valido	Factor de escala
MOD09GA	TERRA	Bandas 1 - 7	500	Día	-100 a 16000	0.0001
MYD09GA	AQUA	Bandas 1 - 7	500	Día	-100 a 16000	0.0001
MOD09GQ	TERRA	Bandas 1 - 2	250	Día	-100 a 16000	0.0001
MYD09GQ	AQUA	Bandas 1 - 2	250	Día	-100 a 16000	0.0001
MOD09Q1	TERRA	Bandas 1 - 2	250	8 día	-100 a 16000	0.0001
MYD09Q1	AQUA	Bandas 1 - 2	250	8 día	-100 a 16000	0.0001
MOD09A1	TERRA	Bandas 1 - 7	500	8 día	-100 a 16000	0.0001
MYD09A1	AQUA	Bandas 1 - 7	500	8 día	-100 a 16000	0.0001

Figura 2.9: Productos de la versión 6 de la Reflectancia de la superficie MODIS 09.

Fuente: Adaptado de la USGS.

Clave	Resolución temporal	Resolución espacial	Sensor	Factor de escala	Rango valido	Extensión
MOD13A1	16 días	500	TERRA	0.0001	-2000 a 10000	Zona
MOD13A2	16 días	1000	TERRA	0.0001		Zona
MOD13A3	Mensual	1000	TERRA	0.0001		Zona
MOD13C1	16 días	5600	TERRA	0.0001		Global
MOD13C2	Mensual	5600	TERRA	0.0001		Global
MOD13Q1	16 días	250	TERRA	0.0001		Zona
MYD13A1	16 días	500	AQUA	0.0001		Zona
MYD13A2	16 días	1000	AQUA	0.0001		Zona
MYD13A3	Mensual	1000	AQUA	0.0001		Zona
MYD13C1	16 días	5600	AQUA	0.0001		Global
MYD13C2	Mensual	5600	AQUA	0.0001		Global
MYD13Q1	16 días	250	AQUA	0.0001		Zona

Figura 2.10: Producto de la versión 6 del índice de vegetación (NDVI y EVI).

Fuente: Adaptado de la USGS.



3 MÉTODO DE LA INVESTIGACIÓN

3.1. Enfoque

El modelo de enfoque del proyecto de tesis es **CUANTITATIVO**, puesto que la siguiente investigación presenta los procesos y características acordes con este enfoque. Una de las características que posee la presente investigación es la recolección y análisis estadístico de índices e indicadores a nivel de la cuenca del Mantaro y también a nivel de Perú, los cuales también son acordes con el enfoque cuantitativo.

3.2. Alcances

Para llegar a los objetivos específicos, es necesario implementar en estudio de alcance **RELACIONAL**, puesto que en la presente investigación se tiene como finalidad conocer la relación o grado de asociación que existe entre diversos índices de forma tal que se pueda evaluar de forma adecuada las posibles sequías en una determina cuenca. En vista que la falta de integración de índice genera vacíos en la evaluación de sequías, se realizará la medición de índices, cuantificación, análisis y posterior vinculación que existen entre estos.

3.3. Diseño de investigación

El diseño de la investigación es el plan o estrategia que se desarrolla para obtener información que se requiere en una investigación. La investigación no experimental son estudios que se

realizan sin la manipulación deliberada de variables y en lo que sólo se observan fenómenos en su ambiente natural para luego analizarlos (Carrasco, 2005).

Dentro del marco de este proyecto y dada las características del mismo, donde se intenta evaluar distintos índices y medir el grado de interrelación entre ellos. Siendo una **INVESTIGACIÓN DESCRIPTIVA**, y el tipo de diseño aplicado es **NO EXPERIMENTAL**, que se muestra en las técnicas, instrumentos y operacionalización de las variables que tienen relación con los problemas y objetivos planteados.

3.4. Población y muestra

Teniendo presente que nuestra unidad de muestreo-análisis son las sequías, las cuales son representadas a partir de distintos índices e indicadores, basados en precipitaciones y monitoreo remoto. La población de estudio, vendría a ser todas las sequías desde el año 1981 hasta 2018, de las regiones Junín, Ayacucho, Huancavelica y Pasco que conforman la cuenca del río Mantaro.

En este trabajo se utilizó un muestreo no probabilístico intencional, ya que en función a lo que se quiere medir se realizó un muestreo entre los años 2015 al 2018. La razón por la que se eligió este lapso, es porque la serie de tiempo del SPI para la cuenca, identifica estos como años con presencia de periodos húmedos y secos, ideal para la evaluación de los índices.

En las muestras no probabilísticas, la elección de los elementos no depende de la probabilidad, sino de causas relacionadas con las características del investigador o del que hace la muestra. Aquí el procedimiento no es mecánico, ni con base en fórmulas de probabilidad, sino que depende del proceso de toma de decisiones de una persona o grupo de personas.

3.5. Hipótesis de la investigación

3.5.1. Hipótesis general

El uso integrado de múltiples índices mejora la detección de sequías evaluadas en la cuenca del Mantaro, respecto al uso de sólo el SPI.

3.5.2. Hipótesis específicas

- 1) El Índice de Precipitación estandarizado, aún no posee cobertura a escala regional.
- 2) El uso complementario de los índices VCI y NDMI, son de gran utilidad en la detección de sequías en la cuenca del río Mantaro.
- 3) Los mapas de persistencias son de gran utilidad en la determinación de coincidencia de eventos de sequías entre los distintos índices.

3.6. Operacionalización de variables

Tabla 3.1: Operacionalización de variables identificadas

Variable	Definición Conceptual	Definición Operacional	Dimensión	Indicadores	Escala de Medición
Sequía	Desviación acumulativa respecto de las condiciones normales o previstas de precipitación, respecto de una media estadística o de un promedio a largo plazo.	Momento de inicio, finalización e intensidad de la sequía, las cuales requieren un conocimiento más detallado de las variables climáticas, así como dispones de series de datos de diferente escala, según el nivel de detalle deseado (horario, diario mensual, estacional, anual)	Sequía Meteorológica, Agrícola, Hidrológica	Magnitud, Severidad e Intensidad	Ninguna
SPI	Índice para evaluar el estado de sequía o exceso de lluvia. La idea del SPI es tener una idea de qué tan probable es tener una cantidad de lluvia igual o menor. Valores altos del SPI están asociados con épocas muy húmedas mientras que valores bajos indican sequía.	Es el número de desviaciones estándar que la precipitación acumulada se desvía del promedio climatológico. Esto indica que valores por debajo de un valor -1 indican condiciones de déficit significativos, mientras que valores mayores que +1 indican condiciones más húmedas que lo normal.	No posee	Precipitaciones mensuales	De Intervalo
VCI	El VCI es aplicado para la evaluación de sequías donde se manifiestan los cambios del proceso de vegetación, a través de la escala 0 a 1, siendo 0 la condición extremadamente malo y el valor de 1 condiciones óptimas.	El VCI compara el valor del EVI actual con el rango de valores del EVI de anteriores años para la misma ubicación. El VCI se expresa en porcentaje y muestra la ubicación del valor observado entre el máximo y mínimo observado en años anteriores. Valores bajas indican condiciones de sequía agrícola y valores altas condiciones óptimas de la vegetación.	No posee	Índice de vegetación mejorado EVI	De Intervalo
NDMI	Este índice se utiliza para medir la cantidad de agua que posee la vegetación o el nivel de saturación de humedad que posee el suelo. Los valores que se obtienen oscilan entre -1 y 1, para las zonas con menos humedad.	El índice NDWI utiliza la combinación de las reflectancias a 0.86 μm y 1.24 μm eliminando las variaciones inducidas por la estructura interna de los tejidos vegetales y su contenido de materia seca, mejorando la precisión en la determinación del contenido de agua de la vegetación.	No posee	NIR-Infrarrojo cercano, y la banda SWIR-infrarrojo corto	De Intervalo

Fuente: Elaboración propia.

3.6.1. Operacionalización de variables

3.6.2. Variables

Una variable es un factor, evento, situación o fenómeno que representa cierto interés dentro de la investigación y del cual se precisa conocer su intensidad o categoría. Se conoce como variable porque el factor estudiado puede obtener distintos valores, es decir, varía entre una observación y otra. Existen básicamente dos variables que participan de todo proceso de investigación: Independientes, dependientes.

Variables Dependientes. Son aquellas que dependen de la acción (intensidad o característica) de la variable independiente. Las variables dependientes para la presente tesis son, las sequías regionales.

Variables Independientes. Aquellas que se consideran las causas. Se identifica siempre una variable cuya magnitud o característica se relaciona con otra a la cual afecta. Las variables independientes objeto de estudio en la tesis son los **Índices de Precipitación Estandarizados, Índice de Humedad de Diferencia Normalizada, Índice de Condición de Vegetación.** obtenidas mediante el producto PISCO y teledetección.

3.6.3. Indicadores

Al referirnos a los conceptos indicamos que estos no son observables directamente. Por lo tanto, se deben buscar procedimientos que permitan la medición indirecta mediante manifestaciones externas, empíricas y observables. Tales manifestaciones o expresiones reciben el nombre de indicadores.

Indicadores asociados a la variable Dependiente. Magnitud, Severidad, Intensidad.

Indicadores asociados a la variable Independiente. Precipitaciones mensuales, Humedad del suelo, Cobertura vegetal, EVI.

Tabla 3.2: Resumen de variables e indicadores identificados en la investigación.

Tipo	Variabes	Indicadores
Dependientes	Sequía	Magnitud, Severidad, Intensidad
Independientes	Índice de Precipitación Estandarizado	Precipitaciones mensuales
	Índice de Humedad de Diferencia Normalizada	NIR, SWIR
	Índice de Condición de Vegetación	Índice de vegetación mejorada-EVI

Fuente: Elaboración propia.

3.7. Técnicas e instrumentos

Primera etapa: La descarga de los datos PISCO Precipitación(Unstable_Monthly_gaugecomplete_Dataset) y los datos raster de los índices SPI se obtuvieron de manera directa de la página del SENAMHI. Además, se realizó la descarga directa de los índices EVI y las bandas para el NDMI ambas del sensor MODIS, de la página AppEARS (aplicación para extraer y explorar muestras preparadas para análisis), perteneciente a la USGS, Servicio Geológico de los Estados Unidos.

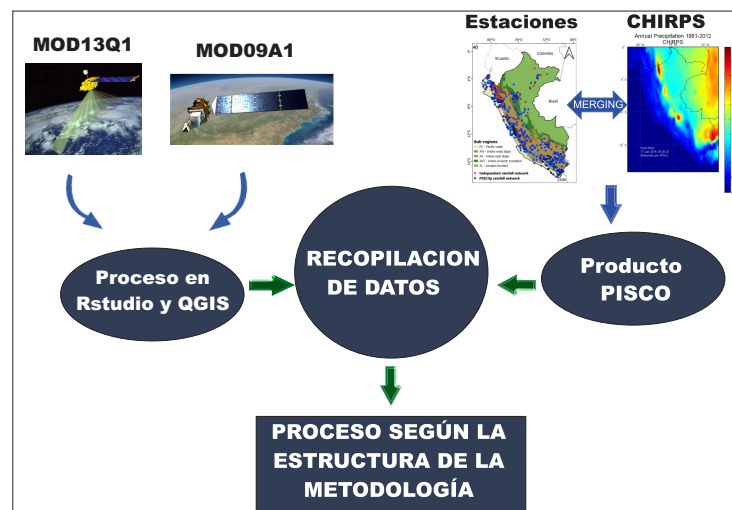


Figura 3.1: Recopilación de datos.

Fuente: Elaboración propia

Segunda etapa: Se realizó la evaluación de la calidad de los datos PISCO-precipitación mediante análisis gráficos y estadísticos. De forma similar se realizó la evaluación de la calidad de los productos MODIS, de forma visual directamente desde el área estadística de la página de la AppEARS y evaluando el código binario de cada uno de los píxeles desde

un software especializado.

Tercera etapa: Corresponde a la corrección de los datos. Los datos PISCO-precipitación ya cuentan sus respectivas correcciones, como se demuestra en la evaluación de consistencia y homogeneidad. Por otro lado, la corrección de datos MODIS se realiza a partir de la filtración de los datos, a través del enmascaramiento de datos poco confiables, con presencia de nubes, aerosol y otros.

Cuarta etapa: Una vez se tiene la certeza de trabajar con datos confiables se procede a la construcción de los índices de sequía, para lo cual se contó con la ayuda del software RStudio.

Quinta etapa: Consiste en evaluar la calidad y confiabilidad de los resultados (índices de sequía), para tal fin se utiliza la correlación existente entre cada uno de los pares de índices, a través del modelo de correlación de Pearson.

Sexta etapa: Como última etapa se realizan los mapas de persistencia de los índices de sequía, considerando intensidad y duración, de forma tal que se tenga una herramienta para la evaluación del posible aporte al integrar distintos índices de sequías a nivel regional.

3.7.1. Instrumentos utilizados.

A continuación se detallará los instrumentos utilizados para la obtención del índice SPI del producto precipitación PISCO, también para los índices de vegetación y humedad:

- **Estaciones meteorológicas:** Instalación destinada a medir y registrar regularmente diversas variables meteorológicas. Específicamente se realizó el uso del pluviómetro, para medir la cantidad de precipitación por metro cuadrado, la que es una de las variables para determinar el SPI.
- **TRMM:** Misión de Medición de Lluvias tropicales. La TRMM forma parte de la Misión al Planeta Tierra. Diseñada para para monitorear y estudiar precipitaciones tropicales y subtropicales, entre 35°N y 35°S.
- **MODIS:** Moderate-Resolution Imaging Spectroradiometer es un instrumento científico lanzado en órbita terrestre por la NASA en 1999 a bordo del satélite Terra y en 2002 a bordo del satélite Aqua.

3.8. Técnicas estadísticas para el procesamiento de la información

PISCO: fueron necesarias algunas técnicas para la evaluación de la calidad y corrección de las series climatológicas. La evaluación de la calidad de los datos fue realizada a través de la curva de doble masa, además se realizó la evaluación de homogeneidad y consistencia de los datos, a través de las pruebas estadísticas T de Student y F de Fisher. Determinándose que los datos PISCO precipitación mensual (PISCOpm), cuya base son datos climatológicos procedentes de SENAMHI y CHIRPM, son datos ya validados y listos para ser utilizados en construcción del SPI.

A continuación, se muestra la correlación existente entre los datos PISCO, SENAMHI y CHIRPM para una estación determinada, donde se observa la cercanía de valores entre los productos. Por otro lado se observa los quiebres por sobreestimación o datos faltantes que presenta SENAMHI, los cuales son corregidos con ayuda del producto CHIRPM, dando como resultado PISCOpm.

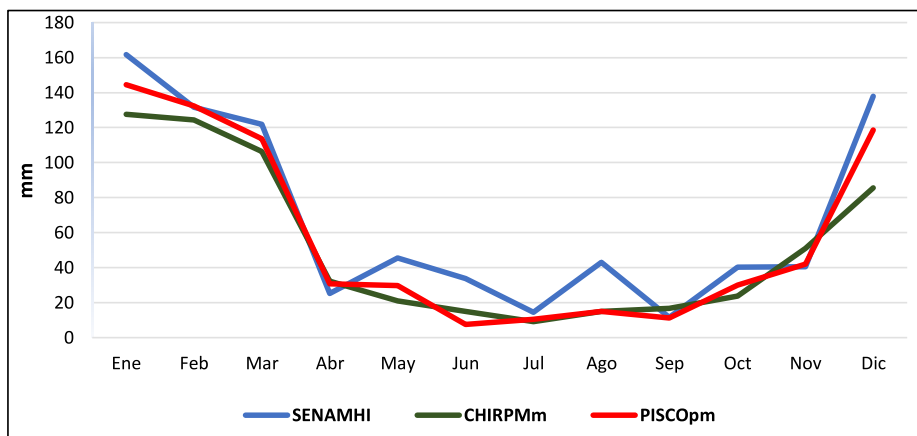


Figura 3.2: Estación:000664-Wayllapampa. Precipitación acumulada 2015.

Fuente: Elaboración propia.

Además, para el procesamiento del producto PISCO, fue necesario un análisis de distribución para la normalización de datos, de no conseguir la normalización se procede a la aplicación de técnicas de transformación como son la Distribución Gamma (Pearson 3). Con la seguridad de estar trabajando con una serie de datos de comportamiento normal, se

realiza el cálculo del SPI.

MODIS: Fueron varias las técnicas estadísticas utilizadas para el procesamiento de datos MODIS, tanto para evaluación de la calidad y corrección de los datos. Valiéndose para tal fin de la ayuda de la Geoestadística mediante el software RStudio.

Por otro lado también se utilizaron técnicas estadísticas para la evaluación de la calidad de los resultados, mediante la relación existente entre los distintos índices, para tal fin se utilizó la prueba estadística de correlación de Pearson.

3.9. Desarrollo de la tesis

3.9.1. Área de estudio

Ubicación: La cuenca del río Mantaro está ubicado en el centro del Perú, entre los paralelos 10°34'30" y 13°35'30" de latitud sur y entre los meridianos 73°55'00" y 76°40'30" de longitud sur. Posee un área total de 34,550.08 Km², se divide en 23 subcuencas. En la margen izquierda del río Mantaro se ubican once subcuencas, mientras que en la margen derecha doce. La subcuenca de mayor extensión es la de Huarpa, ubicada al extremo sur de la cuenca del río Mantaro entre las regiones de Huancavelica y Ayacucho.

Política y administrativamente, la cuenca abarca parcialmente territorios de las regiones Junín, Pasco, Huancavelica y Ayacucho, y limita al norte con otros territorios de la región Pasco, al este con otros territorios de las regiones Pasco, Junín y Ayacucho, al sur con otros territorios de las regiones Ayacucho y Huancavelica, y al oeste con otros territorios de la región Huancavelica y con la región Lima. En la cuenca se concentran importantes capitales de provincias: Junín, La Oroya, Jauja, Concepción, Chupaca y Huancayo en la región Junín; Cerro de Pasco en la región Pasco; Pampas Huancavelica, Churcampá, Acobamba y Lircay en Huancavelica; Huanta y Ayacucho en la región Ayacucho.

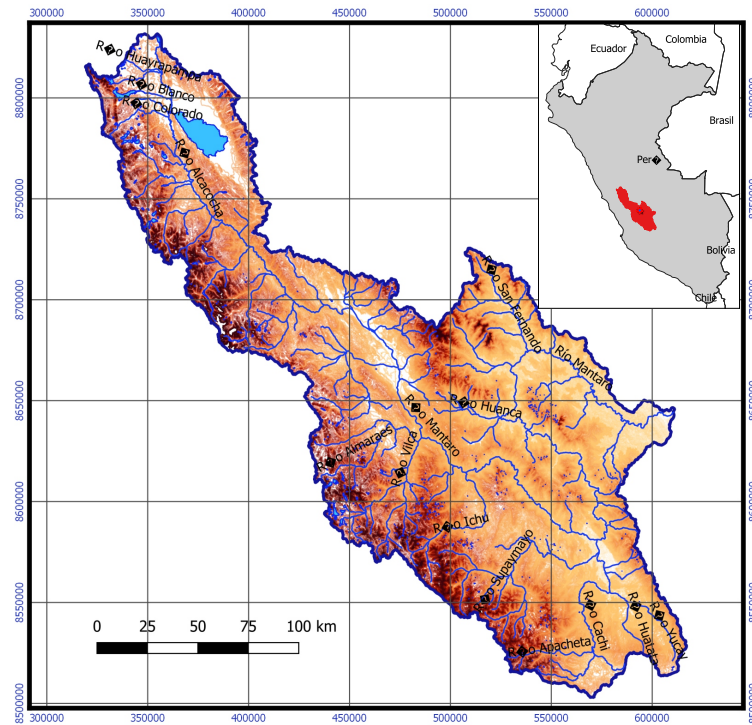


Figura 3.3: Delimitación de la cuenca del Mantaro.

Fuente: Elaboración propia software QGIS.

3.9.2. Características de la zona de estudio

El río Mantaro es uno de ríos más importantes de los Andes Centrales Peruanos, su caudal depende de las precipitaciones en toda la cuenca, del nivel del Lago Junín, y de las lagunas ubicadas al pie de los nevados de la cordillera occidental y del nevado Huaytapallana. En la sierra peruana, la cuenca del río Mantaro cuenta con instrumentos hidrometeorológicos ubicados en toda su extensión, y cuenta con una de las series históricas más largas del Perú (Huayao desde 1921). La cuenca del río Mantaro es de gran importancia por ser la generadora de cerca de 35% de la energía eléctrica del país, la producción agrícola del valle provee de alimentos a Lima, y adicionalmente la población involucrada supera los 700,000 habitantes, Lo anteriormente expresado reafirma que la cuenca juega un rol muy importante en la economía del país.

De acuerdo con los datos de PISCO Precipitaciones, Las precipitaciones como promedio, se inician para toda la cuenca en el mes de julio y se incrementan gradualmente en los meses de agosto y septiembre, haciéndose más significativas a partir de octubre hasta alcanzar valores máximos en febrero. Los meses de máximas precipitaciones son enero, febrero y

marzo, en abril la precipitación disminuye bruscamente, para luego alcanzar los valores mínimos en junio. Este patrón se cumple en casi todas las estaciones de la cuenca. El 88% de la precipitación anual ocurre entre los meses de octubre a abril, de los cuales el 57% están distribuidos casi equitativamente entre los meses de enero, febrero y marzo.

La cantidad de precipitación que acumula cada estación es variable, dependiendo principalmente de la ubicación geográfica. Se observa un ligero aumento de las precipitaciones en las estaciones ubicadas en la parte norte y oeste de la cuenca. También se ha observado una dependencia de la precipitación con la altitud, reportándose que, en las estaciones ubicadas en las partes más altas de la cuenca, los acumulados de lluvias son mayores que en las ubicadas en los valles. Sin embargo, esta dependencia está condicionada por otros aspectos físicos, como son el grado de exposición del terreno al sol, la influencia de la brisa de montaña-valle-montaña, la dirección de los flujos de viento cargados de humedad, entre otros factores.

Las estaciones meteorológicas en estado de funcionamiento dentro de la zona de estudio son 16, monitoreadas por SENAMHI.

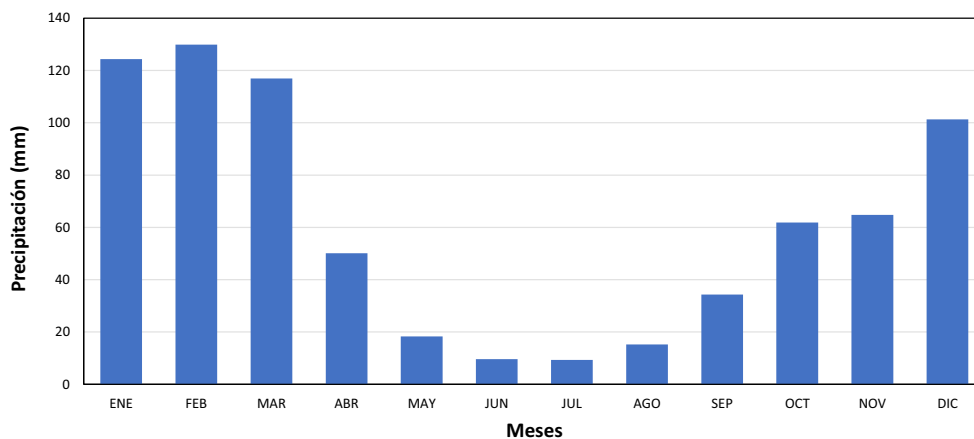


Figura 3.4: Precipitación mensual promedio de las estaciones PISCO, cuenca del mantaro (Período 1981-2018)

Fuente: Elaboración propia.

Tabla 3.3: Estaciones meteorológicas PISCO.

Zona	Estación	Latitud	Longitud	Altitud (msnm)
Norte	Carhuayacan	11°12'1"	76°17'1"	4150
Norte	La Oroya	11°34'34"	75°57'56"	4007
Centro	Ingenio	11°52'51"	75°17'16"	3422
Centro	San Juan de Jarpa	12°07'30"	75°25'55"	3650
Centro	Viques	12°09'45"	75°14'03"	3186
Centro	Huayao	12°02'01"	75°20'20"	3360
Centro	Huancalpi	12°32'32"	75°14'14"	4450
Sur	Huancavelica	12°46'45"	75°02'02"	3770
Sur	Lircay	12°58'57"	74°43'43"	3513
Sur	Acobamba	12°51'51"	74°33'32"	3356
Sur	Pampas	12°23'35"	74°51'58"	3240
Sur	Paucarbamba	12°33'20.4"	75°32'9.4"	3370
Sur	Huanta	12°56'55"	74°14'13"	2682
Sur	La Quinua	13°02'02"	74°08'07"	3316
Sur	Wayllapampa	13°04'36"	74°13'01"	2470
Sur	Santiago de Pischa	13°03'55"	74°21'31"	2990

Fuente: Elaboración propia.

3.9.3. Evaluación de la calidad de series climatológicas PISCO- Análisis de consistencia

La prueba de consistencia se basa en analizar o verificar la hipótesis nula en función de su probabilidad de ocurrencia, para poder aceptarla o rechazarla. Se dice que la serie de datos es homogénea si la probabilidad es grande, en caso contrario se dice que la serie es no homogénea (Andia y Yugar Morales, 2009).

Que un grupo de datos sea consistente quiere decir que hay homogeneidad entre ellos, lo que corresponde a un comportamiento similar de los valores medidos a lo largo del tiempo.

3.9.3.1. Curva doble masa

Consiste en llevar los valores acumulados de la estación en estudio y en la abscisa los valores acumulados de una estación patrón, que viene a ser el promedio de varias estaciones índices.

Del análisis de doble masa se determinó periodos confiables para la mayoría de las estaciones PISCO, tal como se puede apreciar en las siguiente figura:

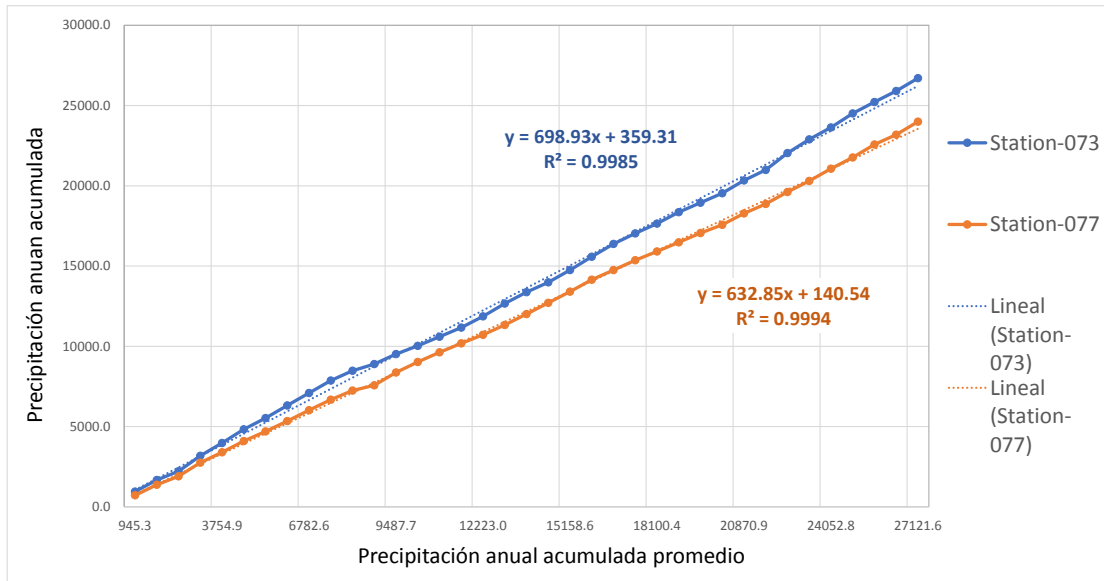


Figura 3.5: Análisis de doble masa para dos de las estaciones-PISCO de la cuenca del Mantaro

Fuente: Elaboración propia.

3.9.3.2. Pruebas estadísticas

Prueba T de Student: La prueba es poderosa y robusta para detectar la inconsistencia en la media, excepto cuando la longitud de los dos períodos seleccionados para comparación de sus medias son desiguales.

Se dice que un test es robusto cuando es insensible a la forma de distribución de probabilidad de la serie. Se recomienda, al aplicar la prueba t de Student que los valores de n_1 y n_2 de cada media que se compara, sean iguales (Campos Aranda, 1998).

La estadística de la prueba t de Student está definida por:

$$t_c = \frac{(x_1 - x_2)}{\left[\left(\frac{(n_1)S_1^2 + (n_2)S_2^2}{n_1 + n_2 - 2} \right) \left(\frac{1}{n_1} + \frac{1}{n_2} \right) \right]^{0.5}} \quad (3.9.1)$$

Siendo S_1^2 , S_2^2 las variables de x_i en los dos períodos de registro respectivamente.

Prueba F de Fisher: La prueba F de Fisher es un método utilizado para verificar la homogeneidad en la varianza, comparando dos muestras (Mejía Abel, 2012)

La prueba está definida por:

$$F_c = \frac{S_1^2(x)}{S_2^2(x)}, \quad \text{si } S_1^2(x) > S_2^2(x) \quad (3.9.2)$$

$$F_c = \frac{S_2^2(x)}{S_1^2(x)}, \quad \text{si } S_2^2(x) > S_1^2(x) \quad (3.9.3)$$

Si $F_c \leq F_{\text{tabla}}$, $S_1 \equiv S_2$ (Existe consistencia en la variancia)

Si $F_c > F_{\text{tabla}}$, $S_1 \neq S_2$ (No existe consistencia en la variancia)

A continuación se muestra el análisis visual de la estación-073 de tal forma que sea una ayuda en el análisis de inconsistencia;

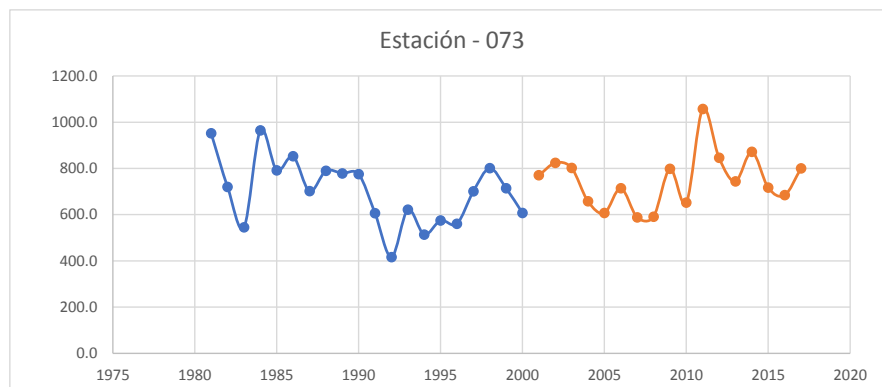


Figura 3.6: Análisis visual de consistencia de la estación-073

Fuente: Elaboración propia.

Finalmente se muestra la evaluación mediante las pruebas estadísticas aplicadas a todas las estaciones-PISCO, resumida en la siguiente tabla:

Tabla 3.4: Resultados del análisis estadístico para las estaciones-PISCO.

#	Estación	T - Student			F - Fisher		
		Tc	Tt	Si, Tc <Tt	Fc	Ft	Si, Fc <Ft
1	Station-073	1.118	2.030	consistencia	1.450	2.288	consistencia
2	Station-077	1.009	2.030	consistencia	1.502	2.288	consistencia
3	Station-078	0.075	2.030	consistencia	1.415	2.288	consistencia
4	Station-098	1.035	2.030	consistencia	1.734	2.288	consistencia
5	Station-107	1.531	2.030	consistencia	1.704	2.288	consistencia
6	Station-110	1.445	2.030	consistencia	1.158	2.288	consistencia
7	Station-117	0.349	2.030	consistencia	1.487	2.288	consistencia
8	Station-118	2.367	2.030	inconsistencia	1.370	2.288	consistencia
9	Station-119	1.890	2.030	consistencia	0.681	2.288	consistencia
10	Station-214	0.208	2.030	consistencia	2.169	2.288	consistencia
11	Station-215	0.079	2.030	consistencia	1.174	2.288	consistencia
12	Station-352	0.833	2.030	consistencia	1.400	2.288	consistencia
13	Station-358	0.516	2.030	consistencia	1.429	2.288	consistencia
14	Station-359	0.918	2.030	consistencia	1.515	2.288	consistencia
15	Station-360	0.680	2.030	consistencia	1.601	2.288	consistencia
16	Station-361	1.587	2.030	consistencia	1.038	2.288	consistencia
17	Station-364	0.548	2.030	consistencia	1.165	2.288	consistencia
18	Station-378	0.444	2.030	consistencia	1.846	2.288	consistencia
19	Station-385	1.062	2.030	consistencia	2.142	2.288	consistencia

Fuente: Elaboración propia.

PISCO producto precipitación trabaja con series climatológicas previamente evaluadas y corregidas, tal y como se demuestra anteriormente en los análisis de homogeneidad y consistencia, motivo por el cual no fueron necesarias las correcciones de estos datos.

3.9.4. Construcción del SPI

Una vez realizado la comprobación del comportamiento normal de los datos de precipitación, se realiza la estimación del SPI, el cual puede ser determinado para diferentes escalas de acumulaciones de tiempo 3,6,9,12 meses (McKee, Doesken, & Kleist, 1993), quien según sus resultados destaca el desempeño de las escalas de 12 y 24 meses. En términos sencillos el SPI, es la diferencia de precipitación con el promedio de una serie de tiempo sobre la desviación estándar (McKee, Doesken, & Kleist, 1993).

Según (McKee, Doesken, & Kleist, 1993), un evento de sequía inicia cuando el SPI es

continuamente positivo y de pronto adquiere un valor de -1 o inferior, hasta cuando vuelve a alcanzar valores por encima de 0.

Un paso importante es definir la escala de meses a utilizar en la detección, cuando la escala de tiempo es corto (3-6 meses) el SPI se mueve más frecuentemente y se puede encontrar una gráfica más ruidosa (McKee DoesKen, & Kleist, 1993). La ventaja de trabajar con períodos más largos, es que el SPI responde más lentamente a los cambios en la precipitación mostrando menos número de picos o períodos para condiciones húmedas y secas (McKee, DoesKen, & Kleist, 1993). En la presente investigación se propone utilizar una escala de 12 meses, dado el desempeño que muestra en otros estudios. Una vez determinada la escala de meses a utilizar en la determinación del SPI, el paso siguiente consiste en determinar los criterios a utilizar para la identificación de eventos de sequía, los cuales serán definidos y explicados con más detalle en la sección de resultados.

Tabla 3.5: Criterios para la búsqueda de eventos extremos de sequía.

Clase	Escala i meses SPI	Rango SPI	Persistencia en meses
A	12	$X \leq -2.0$	12
B	12	$X \leq -1.0$	12

Fuente: Elaboración propia.

Los eventos a detectar, mostrados en la tabla 3.3, toman registro de las anomalías que persistieron como mínimo en condiciones muy seca entre 1 y 2 años, lo que permite enfocarse en aquellas zonas que representan una gran anomalía con potencial de impacto. Definidos los criterios temporales, se hace una búsqueda en los SPI de PISCO que cumplen con las condiciones de intensidad y persistencia para ambas clasificaciones (A y B). Encontrados los eventos se comparan con los registros de los diarios para validar la existencia de los mismos.

Dado que uno de los criterios en la detección de sequías es la intensidad de los eventos, se recurre a la serie de tiempo del SPI 12 meses para la cuenca del Mantaro. En la siguiente serie realizada con datos PISCO, se muestra cuales eventos considera como extremos, moderados y no sequías para la cuenca.

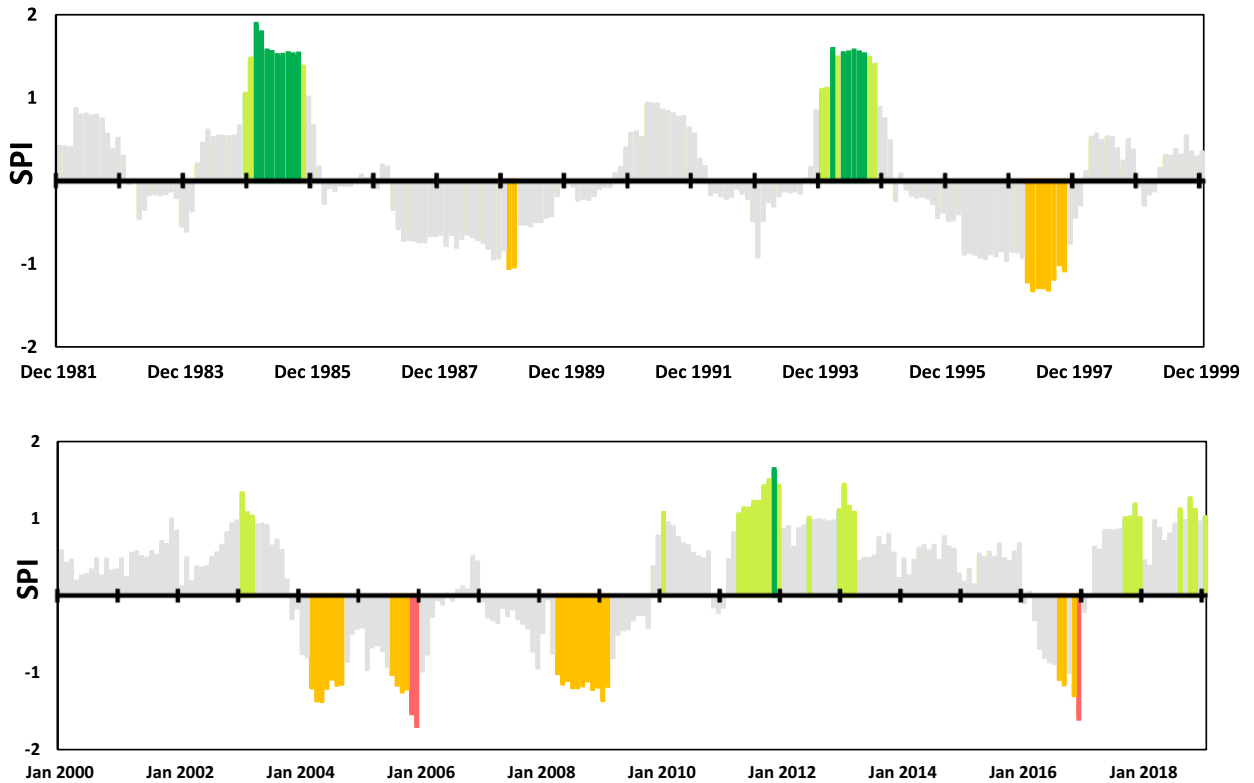


Figura 3.7: Series de tiempo del SPI 12 meses, Cuenca de Mantaro

Fuente: Elaboración propia.

A continuación, se muestra el SPI para el año 2016, constituido como un evento de clase A, mostrándose sequías severas hacia finales de año, además de mostrar bastante similitud con el evento documentado para ese año. Validados por prensa de esa época, puesto que estuvo catalogado como una de las últimas sequías severas (Ene 2016-Dic 2016), seguidas de intensas lluvias en los meses de febrero y marzo, que provocaron terribles huaycos en la cuenca del Mantaro.

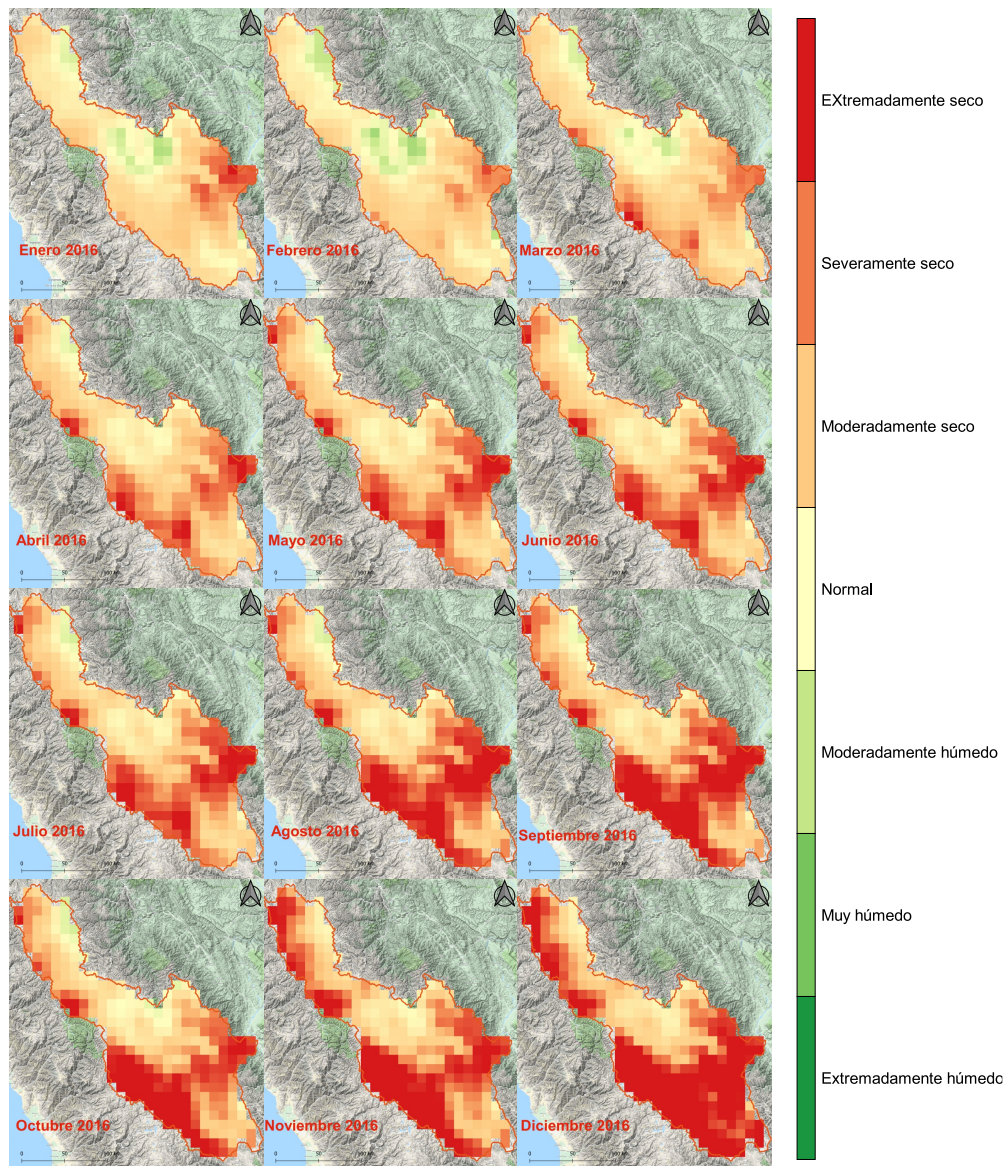


Figura 3.8: Mapas SPI período Ene2016-Dic2016. Evento Extremo Clase A

Fuente: Elaboración propia.

Las figuras con los mapas de SPI, son una muestra que en efecto durante el período detectado se sufrió un fenómeno de sequía. Sin embargo, la información presentada en las series de tiempo, refleja que los criterios de eventos extremos permiten centrar la atención en los eventos más intensos y que otros eventos, aunque menores también importantes son ignorados.

La siguiente gráfica correspondiente al año 2018, PISCO sólo registra los meses de Enero y Febrero como evento de sequía moderada, sin embargo existe registros del “INDECT” que dan cuenta de sequías moderadas en la cuenta del Mantaro allá por los meses de noviembre y diciembre del 2018, por lo que se acude a otros índices para contrastar dicha información.

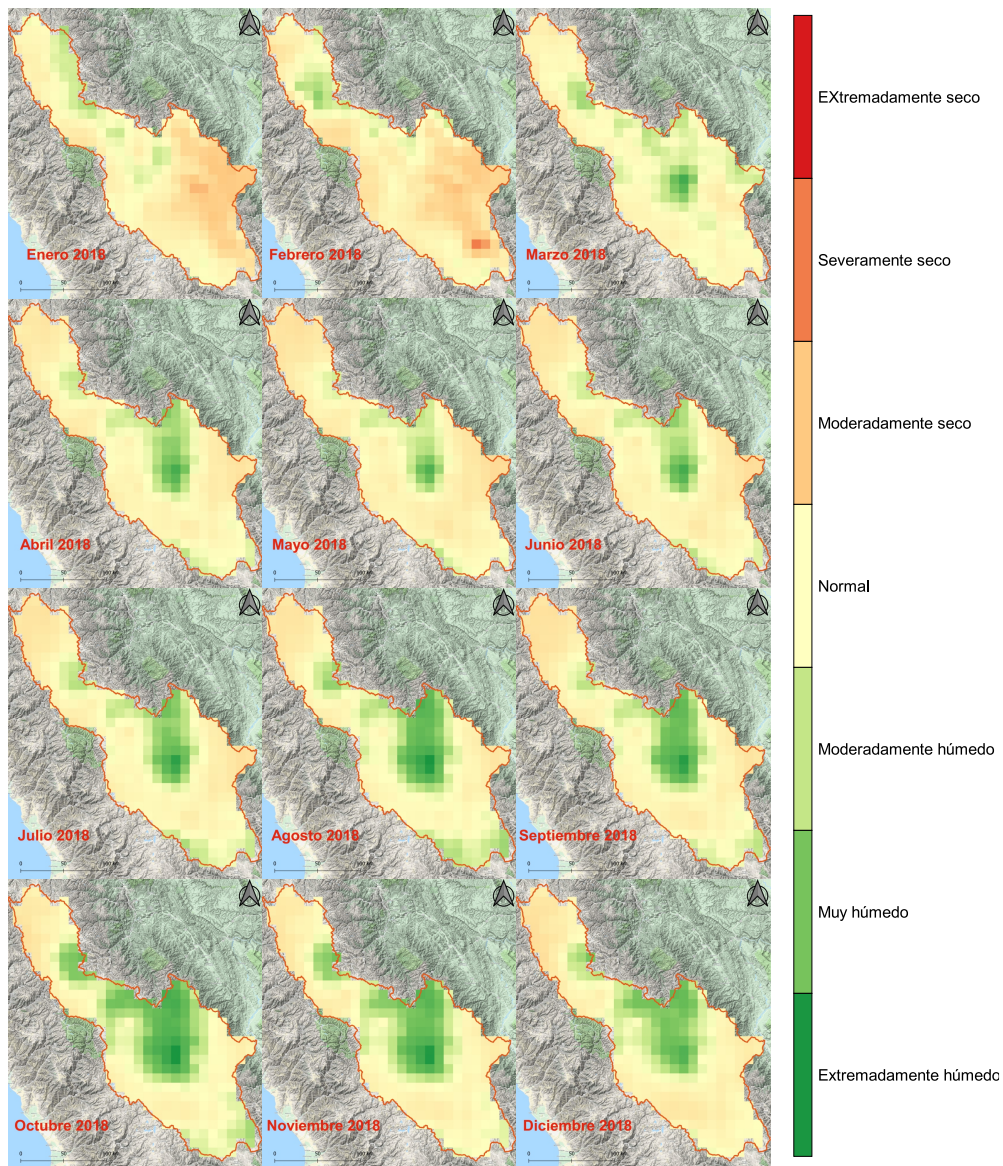


Figura 3.9: Mapas SPI período Ene2018-Dic2018. Evento Normal

Fuente: Elaboración propia.

3.9.5. Evaluación de la calidad y corrección de los datos MODIS

A continuación, se detallará paso a paso como filtrar datos de calidad, a partir de datos descargados de la “Aplicación para Extraer y Explorar Muestras Preparadas para Análisis”, AppEEARS, la evaluación se realiza a modo de ejemplo para el DOY 321, Día Juliano, que vendría a ser el 07 de noviembre del 2018. Posteriormente se generaliza el filtrado de datos y corrección para todos los años de la muestra. Todo el proceso se realizará con la ayuda del software Rstudio, y los pasos detallados a seguir son los que se muestran a continuación.

Los archivos AppEEARS utilizados son los siguientes:

- *MOD13Q1.006 – 250m – aid0001.nc.*
- *MOD13Q1 – 006 – 250m – 16 – days – VI – Quality – lookup.csv.*

1) Establecer entorno de trabajo

Primero, cargue los paquetes R necesarios para ejecutar la evaluación y corrección de datos. Si le falta alguno de los paquetes, puede descargarlos utilizando el comando `install.packages('missing package')` en la consola.

```
# Cargue los paquetes necesarios en R
library(raster); library(rmarkdown); library(ncdf4); library(sp)
```

A continuación, configure su directorio de entrada / trabajo y cree un directorio de salida para los resultados.
















```
# Establecer el directorio de entrada y cambiar el directorio de trabajo
in_dir <- 'F:/MOD13Q1_02' # IMPORTANTE: necesita actualizar esto
setwd(in_dir)

# Crear y establecer directorio de salida
out_dir <- paste(in_dir, 'R_output/', sep= '')
suppressWarnings(dir.create(out_dir))
```

2) Descarga AppEEARS de un archivo NetCDF-4 (.nc)

La descarga de uno de los archivos se realiza de manera directa desde la página AppEEARS para una solicitud de área de muestra. Si se selecciona NetCDF-4 como formato de salida, las salidas se agruparán en archivos .nc por producto y por función.

Select: All | None 11 Selected (4.91 MB) Q Download ▾

Name	Size
✓  MOD09A1.006_sur_refl_b02_doy2000049_aid0001.tif	
✓  MOD09A1.006_sur_refl_b02_doy2000057_aid0001.tif	
✓  MOD09A1.006_sur_refl_b02_doy2000065_aid0001.tif	498.2 KB
✓  MOD09A1.006_sur_refl_b02_doy2000073_aid0001.tif	506.04 KB
✓  MOD09A1.006_sur_refl_b02_doy2000081_aid0001.tif	496.46 KB
✓  MOD09A1.006_sur_refl_b02_doy2000089_aid0001.tif	527.25 KB
✓  MOD09A1.006_sur_refl_b02_doy2000097_aid0001.tif	507.03 KB
✓  MOD09A1.006_sur_refl_b02_doy2000105_aid0001.tif	501.46 KB
 MOD09A1.006_sur_refl_b02_doy2000113_aid0001.tif	484.54 KB
✓  MOD09A1.006_sur_refl_b02_doy2000121_aid0001.tif	497.65 KB
 MOD09A1.006_sur_refl_b02_doy2000129_aid0001.tif	493.47 KB
✓  MOD09A1.006_sur_refl_b02_doy2000137_aid0001.tif	479.29 KB
✓  MOD09A1.006_sur_refl_b02_doy2000145_aid0001.tif	473.57 KB
 MOD09A1.006_sur_refl_b02_doy2000153_aid0001.tif	475.53 KB
 MOD09A1.006_sur_refl_b02_doy2000161_aid0001.tif	489.45 KB

Download Files
 Save Download List
 SHA-256 Checksums

Figura 3.10: Descarga de imágenes desde AppEEARS, Geo Tiff / NetCDF-4

Fuente: Adaptado desde AppEEARS.

3) Abrir un archivo NetCDF-4 (.nc)

Busque los archivos NetCDF-4 que acaba de descargar en su directorio de trabajo, cree una lista de los archivos e imprima la lista.

```
# Ahora busque archivos descargados
file_list <- list.files(pattern = '.*nc$')
file_list

## [1] "MCD12Q1.006_500m_aid0001.nc" "MOD13Q1.006_250m_aid0001.nc"
```

Observe a continuación que el índice file-list está establecido en 2, para seleccionar el archivo MOD13Q1.006.nc arriba [1,2]. Lea el archivo llamando a la función `n_open()` de la biblioteca `ncdf4`.

```
# Lea el archivo, comencemos con MOD13Q1 versión 6
file_in <- nc_open(file_list[2])
```

4) Lea los metadatos del archivo NetCDF-4

```
# Imprima una lista de variables en el archivo
attributes(file_in$var)$names

## [1] "crs" "_250m_16_days_EVI" "_250m_16_days_VI_Quality"

# Imprima una lista de dimensiones en archivo
attributes(file_in$dim)$names

## [1] "time" "lat" "lon"
```

`_1km_16_days_EVI` y `_1km_16_days_VI_Quality` son las capas de datos que se utilizarán en el siguiente estudio, las cuales son el Índice de Vegetación Mejorada (EVI) y los datos de calidad respectivamente.

A continuación, lea los metadatos para el conjunto de datos EVI.

```
v6_info <- ncatt_get(file_in, "_250m_16_days_EVI")
v6_info

## $_FillValue`
## [1] -3000
##
## $coordinates
## [1] "time lat lon"
##
## $grid_mapping
## [1] "crs"
##
## $valid_min
## [1] -2000
##
## $valid_max
```

```

## [1] 10000
##
## $long_name
## [1] "250m 16 days EVI"
##
## $units
## [1] "EVI"
##
## $scale_factor_err
## [1] 0
##
## $add_offset_err
## [1] 0
##
## $calibrated_nt
## [1] 5
##
## $scale_factor
##[1] 1e-04
##
## $add_offset
## [1] 0

```

Arriba, observe los metadatos útiles, que incluyen elementos como unidades, factor de escala y valor de relleno. A continuación, establezca las matrices del conjunto de datos en variables mediante el comando `ncvar_get()` de la librería `ncdf4`.

```

# Tome los datos EVI e VI Quality y configúrelos en una variable
v6_EVI <- ncvar_get(file_in, "_250m_16_days_EVI")
v6_QA <- ncvar_get(file_in, "_250m_16_days_VI_Quality")

#Dimensiones de la variable
dim(v6_EVI)

## [1] 1313 1430 3

```

En la parte de arriba el archivo NetCDF-4. indica 3 capas o fechas para la dimensión 'tiempo'. Tome las matrices de latitud y longitud que se incluyen en los archivos NetCDF-4.

```
# Establecer matrices lat y lon para datos EVI
lat_EVI <- ncvar_get(file_in, "lat")
lon_EVI <- ncvar_get(file_in, "lon")

# Tome el valor de relleno y configúrelo en NA
fillvalue <- ncatt_get(file_in, "_250m_16_days_EVI", "_FillValue")
v6_EVI[v6_EVI == fillvalue$value] <- NA

# Definir la cadena del sistema de coordenadas de referencia "proj.4"
crs <- CRS("+proj=longlat +ellps=WGS84 +datum=WGS84 +no_defs+ towgs84=0,0,0")

# Tome la primera observaci<U+663C><U+3E33>n de EVI y conjuntos de da-
tos de calidad
v6_EVI <- raster(t(v6_EVI[,1]), xmn=min(lon_EVI), xmx=max(lon_EVI),
ymn=min(lat_EVI), ymx=max(lat_EVI), crs=crs)
v6_EVI_original <- v6_EVI
v6_QA <- raster(t(v6_QA[,1]), xmn=min(lon_EVI), xmx=max(lon_EVI),
ymn=min(lat_EVI), ymx=max(lat_EVI), crs=crs)
```

5) Lea las tablas Quality Lookup de formato CSV

En esta sección, tome el archivo CSV de la quality lookup table (LUT), mediante una solicitud a AppEEARS, léalo en R usando 'read.csv()' y úselo para ayudar a establecer los parámetros de enmascaramiento de calidad.

La calidad LUT para su solicitud (archivos que terminan en lookup.csv) se puede encontrar en Archivos de soporte en la página Download Area Sample:

Download Area Sample








Request: MOD13Q1_02 >			
Supporting Files			
	MOD13Q1-02-MOD13Q1-006-metadata.xml	ISO 19115 Metadata	21.56 KB
	MOD13Q1-02-granule-list.txt	URLs for all source data used in the extraction	327 B
	README.txt	Instructions and details about the request	23.24 KB
	MOD13Q1-02-request.json	JSON file which can be used to create a new request	1.16 MB
	MOD13Q1-006-250m-16-days-VI-Quality-Statistics-QA.csv	Statistics for quality layers	2.12 KB
	MOD13Q1-006-250m-16-days-VI-Quality-lookup.csv	Lookup values for the quality bits	14.45 KB
	MOD13Q1-006-Statistics.csv	Statistics for layers	702 B

Figura 3.11: Descarga del archivo Quality lookup desde AppEEARS

Fuente: Adaptado de AppEEARS.

Luego, busque en el directorio de trabajo el archivo CSV LUT de calidad.

```
# Buscar la tabla look up
lut <- list.files(pattern = '.*lookup.csv$')
lut
## [1] "MOD13Q1-006-250m-16-days-VI-Quality-lookup.csv"
```

A continuación, use la función 'read.csv()' para leer en el archivo CSV como un marco de datos.

```
# Leer en el lut
v6_QA_lut <- read.csv(lut[1])
v6_QA_lut
```

```
## Value MODLAND
## 1 2057 produced, but check other QA
## 2 2058 Pixel produced, but most probably cloudy
## 3 2059 Pixel not produced due to other reasons than clouds
## 4 2061 VI produced, but check other QA
## 5 2062 Pixel produced, but most probably cloudy
```

##	6	2065	VI produced, but check other QA
##	7	2066	Pixel produced, but most probably cloudy
##	8	2109	VI produced, but check other QA
##	9	2110	Pixel produced, but most probably cloudy
##	10	2111	Pixel not produced due to other reasons than clouds
##	11	2112	VI produced with good quality
##	12	2114	Pixel produced, but most probably cloudy
##	13	2115	Pixel not produced due to other reasons than clouds
##	14	2116	VI produced with good quality
##	15	2118	Pixel produced, but most probably cloudy
##	16	2120	VI produced with good quality
##	17	2172	VI produced with good quality
##	18	2175	Pixel not produced due to other reasons than clouds
##	19	2181	VI produced, but check other QA
##	20	2182	Pixel produced, but most probably cloudy
##	21	2183	Pixel not produced due to other reasons than clouds
##	22	2185	VI produced, but check other QA
##	23	2186	Pixel produced, but most probably cloudy
##	24	2189	VI produced, but check other QA
##	25	2190	Pixel produced, but most probably cloudy
##	26	2237	VI produced, but check other QA
##	27	2238	Pixel produced, but most probably cloudy
##	28	2239	Pixel not produced due to other reasons than clouds
##	29	2253	VI produced, but check other QA
##	30	2254	Pixel produced, but most probably cloudy
##	31	2257	VI produced, but check other QA
##	32	2258	Pixel produced, but most probably cloudy
##	33	2261	VI produced, but check other QA
##	34	2262	Pixel produced, but most probably cloudy
##	35	2301	VI produced, but check other QA
##	36	2302	Pixel produced, but most probably cloudy
##	37	2303	Pixel not produced due to other reasons than clouds
##	38	2317	VI produced, but check other QA

## 39	2318	Pixel produced, but most probably cloudy
## 40	2319	Pixel not produced due to other reasons than clouds
## 41	2321	VI produced, but check other QA
## 42	2322	Pixel produced, but most probably cloudy
## 43	2325	VI produced, but check other QA
## 44	2326	Pixel produced, but most probably cloudy
## 45	2365	VI produced, but check other QA
## 46	2366	Pixel produced, but most probably cloudy
## 47	2367	Pixel not produced due to other reasons than clouds
## 48	2372	VI produced with good quality
## 49	2374	Pixel produced, but most probably cloudy
## 50	2376	VI produced with good quality
## 51	2378	Pixel produced, but most probably cloudy
## 52	2380	VI produced with good quality
## 53	2428	VI produced with good quality
## 54	2431	Pixel not produced due to other reasons than clouds
## 55	2441	VI produced, but check other QA
## 56	2442	Pixel produced, but most probably cloudy
## 57	2445	VI produced, but check other QA
## 58	2446	Pixel produced, but most probably cloudy
## 59	2449	VI produced, but check other QA
## 60	2450	Pixel produced, but most probably cloudy
## 61	2493	VI produced, but check other QA
## 62	2495	Pixel not produced due to other reasons than clouds
## 63	2513	VI produced, but check other QA
## 64	2514	Pixel produced, but most probably cloudy
## 65	2517	VI produced, but check other QA
## 66	2518	Pixel produced, but most probably cloudy
## 67	2521	VI produced, but check other QA
## 68	2522	Pixel produced, but most probably cloudy
## 69	2557	VI produced, but check other QA
## 70	2558	Pixel produced, but most probably cloudy
## 71	2559	Pixel not produced due to other reasons than clouds

## 72 3094	Pixel produced, but most probably cloudy	
## 73 3095	Pixel not produced due to other reasons than clouds	
## 74 3098	Pixel produced, but most probably cloudy	
## 75 3102	Pixel produced, but most probably cloudy	
## 76 3134	Pixel produced, but most probably cloudy	
## 77 3135	Pixel not produced due to other reasons than clouds	
## 78 3150	Pixel produced, but most probably cloudy	
## 79 3154	Pixel produced, but most probably cloudy	
## 80 3158	Pixel produced, but most probably cloudy	
## 81 3218	Pixel produced, but most probably cloudy	
## 82 3222	Pixel produced, but most probably cloudy	
## 83 3226	Pixel produced, but most probably cloudy	
## 84 3262	Pixel produced, but most probably cloudy	
## 85 3290	Pixel produced, but most probably cloudy	
## 86 3294	Pixel produced, but most probably cloudy	
## 87 3298	Pixel produced, but most probably cloudy	
## 88 3326	Pixel produced, but most probably cloudy	
## 89 3354	Pixel produced, but most probably cloudy	
## 90 3355	Pixel not produced due to other reasons than clouds	
## 91 3358	Pixel produced, but most probably cloudy	
## 92 3362	Pixel produced, but most probably cloudy	
## 93 3390	Pixel produced, but most probably cloudy	
## 94 3410	Pixel produced, but most probably cloudy	
## 95 3414	Pixel produced, but most probably cloudy	
## 96 3478	Pixel produced, but most probably cloudy	
## 97 3482	Pixel produced, but most probably cloudy	
## 98 3486	Pixel produced, but most probably cloudy	
## 99 3518	Pixel produced, but most probably cloudy	
## 100 3550	Pixel produced, but most probably cloudy	
##	VI Usefulness	Aerosol Quantity
## 1	Decreasing quality	Climatology
## 2	Decreasing quality	Climatology

## 3	Decreasing quality	Climatology
## 4	Decreasing quality	Climatology
## 5	Decreasing quality	Climatology
## 6	Decreasing quality	Climatology
## 7	Decreasing quality	Climatology
## 8	Not useful for any other reason/not processed	Climatology
## 9	Not useful for any other reason/not processed	Climatology
## 10	Not useful for any other reason/not processed	Climatology
## 11	Highest quality	Low
## 12	Highest quality	Low
## 13	Highest quality	Low
## 14	Lower quality	Low
## 15	Lower quality	Low
## 16	Decreasing quality	Low
## 17	Not useful for any other reason/not processed	Low
## 18	Not useful for any other reason/not processed	Low
## 19	Lower quality	Average
## 20	Lower quality	Average
## 21	Lower quality	Average
## 22	Decreasing quality	Average
## 23	Decreasing quality	Average
## 24	Decreasing quality	Average
## 25	Decreasing quality	Average
## 26	Not useful for any other reason/not processed	Average
## 27	Not useful for any other reason/not processed	Average
## 28	Not useful for any other reason/not processed	Average
## 29	Decreasing quality	High
## 30	Decreasing quality	High
## 31	Decreasing quality	High
## 32	Decreasing quality	High
## 33	Decreasing quality	High
## 34	Decreasing quality	High
## 35	Not useful for any other reason/not processed	High

## 36	Not useful for any other reason/not processed	High
## 37	Not useful for any other reason/not processed	High
## 38	Decreasing quality	Climatology
## 39	Decreasing quality	Climatology
## 40	Decreasing quality	Climatology
## 41	Decreasing quality	Climatology
## 42	Decreasing quality	Climatology
## 43	Decreasing quality	Climatology
## 44	Decreasing quality	Climatology
## 45	Not useful for any other reason/not processed	Climatology
## 46	Not useful for any other reason/not processed	Climatology
## 47	Not useful for any other reason/not processed	Climatology
## 48	Lower quality	Low
## 49	Lower quality	Low
## 50	Decreasing quality	Low
## 51	Decreasing quality	Low
## 52	Decreasing quality	Low
## 53	Not useful for any other reason/not processed	Low
## 54	Not useful for any other reason/not processed	Low
## 55	Decreasing quality	Average
## 56	Decreasing quality	Average
## 57	Decreasing quality	Average
## 58	Decreasing quality	Average
## 59	Decreasing quality	Average
## 60	Decreasing quality	Average
## 61	Not useful for any other reason/not processed	Average
## 62	Not useful for any other reason/not processed	Average
## 63	Decreasing quality	High
## 64	Decreasing quality	High
## 65	Decreasing quality	High
## 66	Decreasing quality	High
## 67	Decreasing quality	High
## 68	Decreasing quality	High

## 69	Not useful for any other reason/not processed	High
## 70	Not useful for any other reason/not processed	High
## 71	Not useful for any other reason/not processed	High
## 72	Decreasing quality	Climatology
## 73	Decreasing quality	Climatology
## 74	Decreasing quality	Climatology
## 75	Decreasing quality	Climatology
## 76	Not useful for any other reason/not processed	Climatology
## 77	Not useful for any other reason/not processed	Climatology
## 78	Decreasing quality	Low
## 79	Decreasing quality	Low
## 80	Decreasing quality	Low
## 81	Decreasing quality	Average
## 82	Decreasing quality	Average
## 83	Decreasing quality	Average
## 84	Not useful for any other reason/not processed	Average
## 85	Decreasing quality	High
## 86	Decreasing quality	High
## 87	Decreasing quality	High
## 88	Not useful for any other reason/not processed	High
## 89	Decreasing quality	Climatology
## 90	Decreasing quality	Climatology
## 91	Decreasing quality	Climatology
## 92	Decreasing quality	Climatology
## 93	Not useful for any other reason/not processed	Climatology
## 94	Decreasing quality	Low
## 95	Decreasing quality	Low
## 96	Decreasing quality	Average
## 97	Decreasing quality	Average
## 98	Decreasing quality	Average
## 99	Not useful for any other reason/not processed	Average
## 100	Decreasing quality	High

##	Adjacent cloud detected	Atmosphere BRDF Correction	Mixed Clouds
## 1	No	No	No
## 2	No	No	No
## 3	No	No	No
## 4	No	No	No
## 5	No	No	No
## 6	No	No	No
## 7	No	No	No
## 8	No	No	No
## 9	No	No	No
## 10	No	No	No
## 11	No	No	No
## 12	No	No	No
## 13	No	No	No
## 14	No	No	No
## 15	No	No	No
## 16	No	No	No
## 17	No	No	No
## 18	No	No	No
## 19	No	No	No
## 20	No	No	No
## 21	No	No	No
## 22	No	No	No
## 23	No	No	No
## 24	No	No	No
## 25	No	No	No
## 26	No	No	No
## 27	No	No	No
## 28	No	No	No
## 29	No	No	No
## 30	No	No	No
## 31	No	No	No
## 32	No	No	No

##	33	No	No	No
##	34	No	No	No
##	35	No	No	No
##	36	No	No	No
##	37	No	No	No
##	38	Yes	No	No
##	39	Yes	No	No
##	40	Yes	No	No
##	41	Yes	No	No
##	42	Yes	No	No
##	43	Yes	No	No
##	44	Yes	No	No
##	45	Yes	No	No
##	46	Yes	No	No
##	47	Yes	No	No
##	48	Yes	No	No
##	49	Yes	No	No
##	50	Yes	No	No
##	51	Yes	No	No
##	52	Yes	No	No
##	53	Yes	No	No
##	54	Yes	No	No
##	55	Yes	No	No
##	56	Yes	No	No
##	57	Yes	No	No
##	58	Yes	No	No
##	59	Yes	No	No
##	60	Yes	No	No
##	61	Yes	No	No
##	62	Yes	No	No
##	63	Yes	No	No
##	64	Yes	No	No
##	65	Yes	No	No

## 66	Yes	No	No
## 67	Yes	No	No
## 68	Yes	No	No
## 69	Yes	No	No
## 70	Yes	No	No
## 71	Yes	No	No
## 72	No	No	Yes
## 73	No	No	Yes
## 74	No	No	Yes
## 75	No	No	Yes
## 76	No	No	Yes
## 77	No	No	Yes
## 78	No	No	Yes
## 79	No	No	Yes
## 80	No	No	Yes
## 81	No	No	Yes
## 82	No	No	Yes
## 83	No	No	Yes
## 84	No	No	Yes
## 85	No	No	Yes
## 86	No	No	Yes
## 87	No	No	Yes
## 88	No	No	Yes
## 89	Yes	No	Yes
## 90	Yes	No	Yes
## 91	Yes	No	Yes
## 92	Yes	No	Yes
## 93	Yes	No	Yes
## 94	Yes	No	Yes
## 95	Yes	No	Yes
## 96	Yes	No	Yes
## 97	Yes	No	Yes
## 98	Yes	No	Yes

## 99	Yes	No	Yes
## 100	Yes	No	Yes
##	Land/Water Mask	Possible snow/ice	Possible shadow
## 1	Land (Nothing else but land)	No	No
## 2	Land (Nothing else but land)	No	No
## 3	Land (Nothing else but land)	No	No
## 4	Land (Nothing else but land)	No	No
## 5	Land (Nothing else but land)	No	No
## 6	Land (Nothing else but land)	No	No
## 7	Land (Nothing else but land)	No	No
## 8	Land (Nothing else but land)	No	No
## 9	Land (Nothing else but land)	No	No
## 10	Land (Nothing else but land)	No	No
## 11	Land (Nothing else but land)	No	No
## 12	Land (Nothing else but land)	No	No
## 13	Land (Nothing else but land)	No	No
## 14	Land (Nothing else but land)	No	No
## 15	Land (Nothing else but land)	No	No
## 16	Land (Nothing else but land)	No	No
## 17	Land (Nothing else but land)	No	No
## 18	Land (Nothing else but land)	No	No
## 19	Land (Nothing else but land)	No	No
## 20	Land (Nothing else but land)	No	No
## 21	Land (Nothing else but land)	No	No
## 22	Land (Nothing else but land)	No	No
## 23	Land (Nothing else but land)	No	No
## 24	Land (Nothing else but land)	No	No
## 25	Land (Nothing else but land)	No	No
## 26	Land (Nothing else but land)	No	No
## 27	Land (Nothing else but land)	No	No
## 28	Land (Nothing else but land)	No	No
## 29	Land (Nothing else but land)	No	No

## 30	Land (Nothing else but land)	No	No
## 31	Land (Nothing else but land)	No	No
## 32	Land (Nothing else but land)	No	No
## 33	Land (Nothing else but land)	No	No
## 34	Land (Nothing else but land)	No	No
## 35	Land (Nothing else but land)	No	No
## 36	Land (Nothing else but land)	No	No
## 37	Land (Nothing else but land)	No	No
## 38	Land (Nothing else but land)	No	No
## 39	Land (Nothing else but land)	No	No
## 40	Land (Nothing else but land)	No	No
## 41	Land (Nothing else but land)	No	No
## 42	Land (Nothing else but land)	No	No
## 43	Land (Nothing else but land)	No	No
## 44	Land (Nothing else but land)	No	No
## 45	Land (Nothing else but land)	No	No
## 46	Land (Nothing else but land)	No	No
## 47	Land (Nothing else but land)	No	No
## 48	Land (Nothing else but land)	No	No
## 49	Land (Nothing else but land)	No	No
## 50	Land (Nothing else but land)	No	No
## 51	Land (Nothing else but land)	No	No
## 52	Land (Nothing else but land)	No	No
## 53	Land (Nothing else but land)	No	No
## 54	Land (Nothing else but land)	No	No
## 55	Land (Nothing else but land)	No	No
## 56	Land (Nothing else but land)	No	No
## 57	Land (Nothing else but land)	No	No
## 58	Land (Nothing else but land)	No	No
## 59	Land (Nothing else but land)	No	No
## 60	Land (Nothing else but land)	No	No
## 61	Land (Nothing else but land)	No	No
## 62	Land (Nothing else but land)	No	No

## 63	Land (Nothing else but land)	No	No
## 64	Land (Nothing else but land)	No	No
## 65	Land (Nothing else but land)	No	No
## 66	Land (Nothing else but land)	No	No
## 67	Land (Nothing else but land)	No	No
## 68	Land (Nothing else but land)	No	No
## 69	Land (Nothing else but land)	No	No
## 70	Land (Nothing else but land)	No	No
## 71	Land (Nothing else but land)	No	No
## 72	Land (Nothing else but land)	No	No
## 73	Land (Nothing else but land)	No	No
## 74	Land (Nothing else but land)	No	No
## 75	Land (Nothing else but land)	No	No
## 76	Land (Nothing else but land)	No	No
## 77	Land (Nothing else but land)	No	No
## 78	Land (Nothing else but land)	No	No
## 79	Land (Nothing else but land)	No	No
## 80	Land (Nothing else but land)	No	No
## 81	Land (Nothing else but land)	No	No
## 82	Land (Nothing else but land)	No	No
## 83	Land (Nothing else but land)	No	No
## 84	Land (Nothing else but land)	No	No
## 85	Land (Nothing else but land)	No	No
## 86	Land (Nothing else but land)	No	No
## 87	Land (Nothing else but land)	No	No
## 88	Land (Nothing else but land)	No	No
## 89	Land (Nothing else but land)	No	No
## 90	Land (Nothing else but land)	No	No
## 91	Land (Nothing else but land)	No	No
## 92	Land (Nothing else but land)	No	No
## 93	Land (Nothing else but land)	No	No
## 94	Land (Nothing else but land)	No	No
## 95	Land (Nothing else but land)	No	No

## 96 Land (Nothing else but land)	No	No
## 97 Land (Nothing else but land)	No	No
## 98 Land (Nothing else but land)	No	No
## 99 Land (Nothing else but land)	No	No
## 100 Land (Nothing else but land)	No	No

La tabla de arriba muestra la información de calidad contenida en la LUT. Los datos mostrados se refieren a los valores en de cada uno de los píxel de una imagen, seguidos del bit específico que comienza con MODLAND. AppEEARS decodifica cada campo de bits de calidad binaria en información más significativa para el usuario.

El caso de estudio utilizó los siguientes parámetros de calidad para definir su proceso de detección:

- 1) MODLAND_QA flag = 0 or 1
 - 0 = good quality
 - 1 = check other QA
- 2) VI usefulness <= 11
 - 0000 Highest quality = 0
 - 0001 Lower quality = 1
 - 0010 Decreasing quality = 2
 - ...
 - 1011 Decreasing quality = 11
- 3) Adjacent cloud detected, Mixed Clouds, and Possible shadow = 0 0 = No
- 4) Aerosol Quantity = 1 or 2
 - 1 = low aerosol
 - 2 = average aerosol

A continuación se utilizará los parámetros del indicador de calidad de píxeles descritos anteriormente para filtrar los datos. Se buscará la tabla de datos por columna y valor, y se mantendrá los valores específicos relacionados con los parámetros descritos anteriormente.

Observe en la línea: `v6_QA_lut < -v6_QA_lut[v6_QA_lut$MODLAND%en%modland,]`, incluye todas las filas donde la columna MODLAND es 'VI produced with good quality' o

‘VI produced, but check other QA’.

Sin embargo, en la línea: `v6_QA_lut <- v6_QA_lut[!v6_QA_lut$VI.Usefulness%en%VIU,]`, al agregar el ‘!’ delante del comando, la tabla de datos excluirá los valores en la variable VIU.

```
# Excluir mala calidad basada en MODLAND
modland <- c('VI produced with good quality', 'VI produced, but check other QA')
v6_QA_lut <- v6_QA_lut[v6_QA_lut$MODLAND %in% modland,]

# Incluir una mejor calidad VI usefulness
VIU <- c("Lowest quality", "Quality so low that it is not useful", "L1B data_
faulty", "Not useful for any other reason/not processed")
v6_QA_lut <- v6_QA_lut[!v6_QA_lut$VI.Usefulness %in% VIU,]

# Excluir climatología o aerosol alto
AQ <- c('Low', 'Average')
v6_QA_lut <- v6_QA_lut[v6_QA_lut$Aerosol.Quantity %in% AQ,]

# Incluya donde no se detectaron nubes adyacentes, nubes mixtas o posi-
ble sombra
v6_QA_lut <- v6_QA_lut[v6_QA_lut$Adjacent.cloud.detected == 'No',]
v6_QA_lut <- v6_QA_lut[v6_QA_lut$Mixed.Clouds == 'No', ]
v6_QA_lut <- v6_QA_lut[v6_QA_lut$Possible.shadow == 'No',]
v6_QA_lut
```

##	Value	MODLAND
## 11	2112	VI produced with good quality
## 14	2116	VI produced with good quality
## 16	2120	VI produced with good quality
## 19	2181	VI produced, but check other QA
## 22	2185	VI produced, but check other QA
## 24	2189	VI produced, but check other QA
## 116	4160	VI produced with good quality
## 119	4164	VI produced with good quality

##	122	4168		VI produced with good quality
##	126	4229		VI produced, but check other QA
##	129	4233		VI produced, but check other QA
##	132	4237		VI produced, but check other QA
##	187	6208		VI produced with good quality
##	190	6212		VI produced with good quality
##	192	6216		VI produced with good quality
##	196	6277		VI produced, but check other QA
##	199	6281		VI produced, but check other QA
##	201	6285		VI produced, but check other QA
##		VI Usefulness		Aerosol Quantity
##	11	Highest quality		Low
##	14	Lower quality		Low
##	16	Decreasing quality		Low
##	19	Lower quality		Average
##	22	Decreasing quality		Average
##	24	Decreasing quality		Average
##	116	Highest quality		Low
##	119	Lower quality		Low
##	122	Decreasing quality		Low
##	126	Lower quality		Average
##	129	Decreasing quality		Average
##	132	Decreasing quality		Average
##	187	Highest quality		Low
##	190	Lower quality		Low
##	192	Decreasing quality		Low
##	196	Lower quality		Average
##	199	Decreasing quality		Average
##	201	Decreasing quality		Average
##		Adjacent cloud detected	Atmosphere BRDF Correction	Mixed Clouds
##	11	No	No	No

## 14	No	No	No
## 16	No	No	No
## 19	No	No	No
## 22	No	No	No
## 24	No	No	No
## 116	No	No	No
## 119	No	No	No
## 122	No	No	No
## 126	No	No	No
## 129	No	No	No
## 132	No	No	No
## 187	No	No	No
## 190	No	No	No
## 192	No	No	No
## 196	No	No	No
## 199	No	No	No
## 201	No	No	No
##	Land/Water Mask	Possible snow/ice	Possible shadow
## 11	Land (Nothing else but land)	No	No
## 14	Land (Nothing else but land)	No	No
## 16	Land (Nothing else but land)	No	No
## 19	Land (Nothing else but land)	No	No
## 22	Land (Nothing else but land)	No	No
## 24	Land (Nothing else but land)	No	No
## 116	Ocean coastlines and lake shorelines	No	No
## 119	Ocean coastlines and lake shorelines	No	No
## 122	Ocean coastlines and lake shorelines	No	No
## 126	Ocean coastlines and lake shorelines	No	No
## 129	Ocean coastlines and lake shorelines	No	No
## 132	Ocean coastlines and lake shorelines	No	No
## 187	Shallow inland water	No	No
## 190	Shallow inland water	No	No

## 192 Shallow inland water	No	No
## 196 Shallow inland water	No	No
## 199 Shallow inland water	No	No
## 201 Shallow inland water	No	No

6) Establecer filtrado de QA/QC personalizado (máscara)

En esta sección se muestra como tomar posibles valores de la lista (en función de los requisitos de calidad) mostrado arriba y enmascarar los EVI y las matrices de calidad para incluir solo píxeles donde el valor de calidad está en la lista de valores de 'good quality' en función de los parámetros del caso de estudio.

```
# Imprima la lista de posibles valores de control de calidad según los parámetros anteriores
v6_QA_mask <- v6_QA_lut$Value
v6_QA_mask
## [1] 2112 2116 2120 2181 2185 2189 4160 4164 4168 4229 4233 4237 6208
## [14] 6212 6216 6277 6281 6285
```

Entonces, arriba, sólo los píxeles con esos valores específicos de *_250m_16_days_VI_Quality* se incluirán después de enmascarar a continuación.

A continuación, enmascare la primera observación de los conjuntos de datos. Observe la '!' delante de la matriz, lo que significa que no desea excluir la lista de valores anterior, sino excluir cualquier otro valor.

```
# Aplicar máscara de control de calidad(QA) a los datos EVI
v6_EVI[!v6_QA %in% v6_QA_mask,]<- NA
v6_EVI_qamasked <- v6_EVI
```

7) Visualización de los datos NetCDF-4

En esta sección se muestra el gráfico básico de los datos EVI, y el gráfico con datos filtrados a manera de comparación.

```
# Visualize el ploteo original
plot(v6_EVI_original)
```

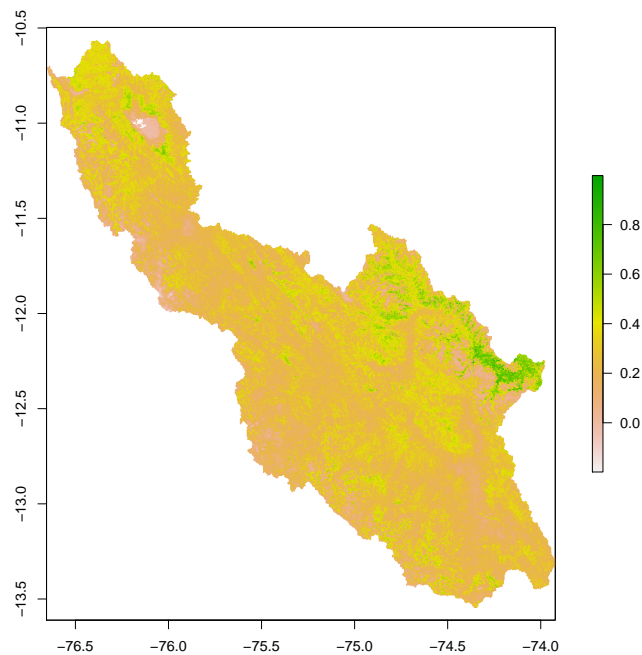


Figura 3.12: Imagen básica raster de datos EVI de la cuenca del Mantaro.

Fuente: Elaboración propia software RStudio.

A continuación, se agrega algunos parámetros adicionales a la visualización. Se usa `'cellStats()'` del paquete Ráster para calcular estadísticas en una matriz ráster completa.

```
# Min, Max, and Mean
print(paste0('Min NDVI:', cellStats(v6_EVI_original, stat='min', na.rm=TRUE)))

## [1] "Min NDVI:-0.1993"

print(paste0('Max NDVI:', cellStats(v6_EVI_original, stat='max', na.rm=TRUE)))

## [1] "Max NDVI:0.9976"

print(paste0('Mean NDVI:', cellStats(v6_EVI_original, stat='mean', na.rm=TRUE)))

## [1] "Mean NDVI:0.261434745268762"
```

```

# Importar colormaps adicionales
library(RColorBrewer)
# Crear personalizado colormap
YlGn <- brewer.pal(9, "YlGn")
# Trace los datos sin filtrar para el paso de tiempo 1, utilizando un mapa de colores y estableciendo un estiramiento lineal personalizado
plot(v6_EVI_original, zlim=c(-0.2,1.0), maxpixels = 20000000, col = YlGn,
xaxt='n', yaxt='n')

```

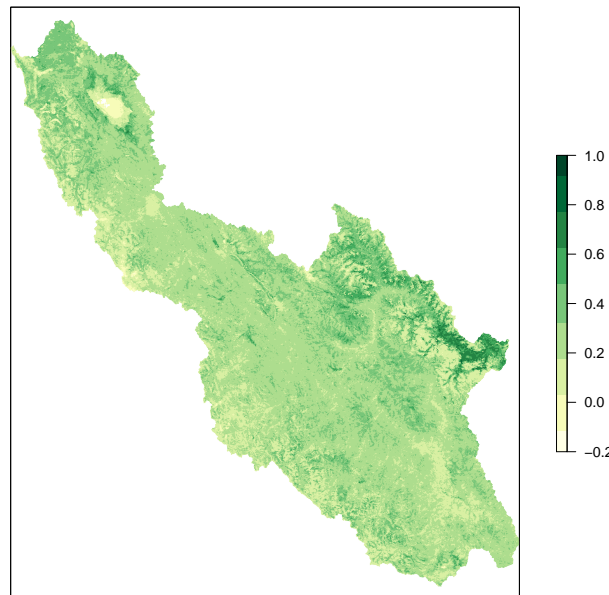


Figura 3.13: Mejor visualización de los datos EVI.

Fuente: Elaboración propia software RStudio.

Finalmente a continuación se muestran los datos filtrados de calidad:

```

# Imprimir los datos enmascarados
plot(v6_EVI, zlim=c(-0.2,1.0), maxpixels = 20000000, col = YlGn, yaxt='n',
yaxt='n', legend.args=list(text='EVI', side=4, font=2, line=2.5, cex=0.8))

title("MODIS Version 6 índice de Vegetacion. mejorado con datos filtrados de calidad")

```

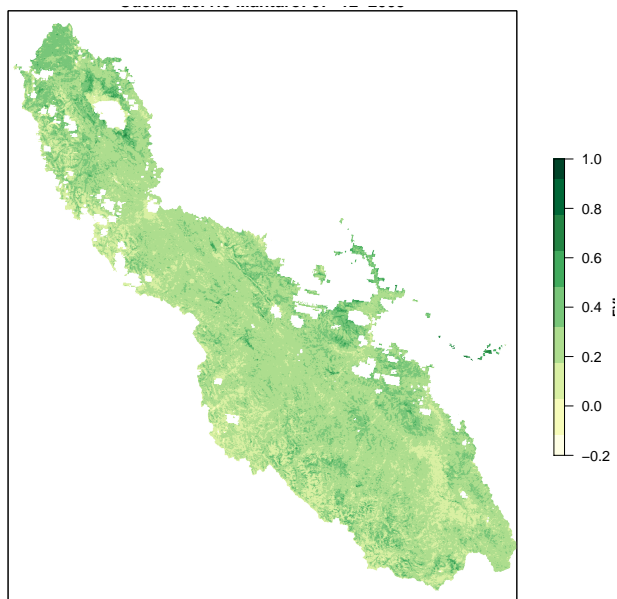


Figura 3.14: Índice de Vegetación mejorado con datos filtrados de calidad, cuenca del río Mantaro: 17-11-2018.

Fuente: Elaboración propia software RStudio.

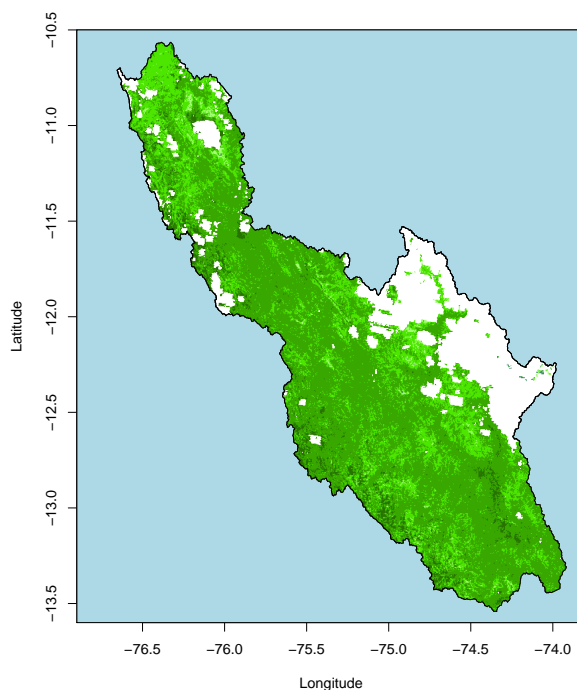


Figura 3.15: Datos filtrados de calidad de mejor visualización (17_NOV_2018)

Fuente: Elaboración propia software RStudio.

3.9.6. Construcción del Índice de Condición de Vegetación (VCI)

Entre las investigaciones, los índices de vegetación, se encuentran entre los productos de datos más utilizados para la evaluación, el monitoreo y la medición de la cobertura vegetal, la condición y los cambios. El VCI se obtiene a partir del Índice de Vegetación mejorada (EVI), el cual se optimizó a partir de NDVI aumentando la sensibilidad en las regiones de alta biomasa.

$$VCI_{ijk} = \frac{EVI_{ijk} - EVI_{(i,min)}}{EVI_{(i,max)} - EVI_{(i,min)}} \quad (3.9.4)$$

Donde:

EVI : Índice de Vegetación Mejorada.

DOY : Día Juliano de la imagen.

$EVI_{i,min}$: Índice de vegetación mínimo de varios años para el píxel i.

$EVI_{i,max}$: Índice de vegetación máximo de varios años para el píxel i.

VCI_{ijk} es el valor del VCI para el píxel i durante el DOY j, para el año k. EVI_{ijk} , es el valor para el píxel i en el DOY j del año k.

La elaboración del EVI está basado en los datos de MODIS a una resolución espacial de 250 m y es la que sirve de entrada para generar el Índice de Condición de Vegetación (VCI). El único producto MODIS que proporciona datos de EVI es MOD13Q1 (en el satélite Terra) y MYD13Q1 (en el satélite Aqua). Los datos de MODIS están disponibles en la Aplicación para Extracción y Explotación de Muestras Preparadas para Análisis (AppEEARS) por USGS.

The screenshot displays the AppEEARS web application interface. At the top, the USGS logo and 'AppEEARS' are visible, along with navigation links for 'Extract', 'Explore', and 'Help'. The main content area is divided into several sections:

- Sample Identification:** A text input field contains 'Cuenca del río Mantaro'.
- File Upload:** A dashed blue box contains instructions: 'Drop a vector polygon file containing the area feature(s) to extract or click here to select the file.' Below this, supported file formats are listed: ESRI Shapefile (.zip including .shp, .dbf, .prj, and .shx files) and GeoJSON (.json or .geojson).
- Date Selection:** 'Start Date' is set to '01-01-2000' and 'End Date' is set to '05-09-2019'. There is a checkbox for 'Is Date Recurring?' which is currently unchecked.
- Layer Selection:** A list of layers is shown. The selected layer is 'Terra MODIS Vegetation Indices (NDVI & EVI) MOD13Q1.006, 250m, 16 day, (2000-02-18 to Present)'. Other visible layers include '_250m_16_days_NIR_reflectance', '_250m_16_days_VI_Quality', and '_250m_16_days_blue_reflectance'.
- Selected Layers:** A list of two layers is shown: '_250m_16_days_EVI' and '_250m_16_days_pixel_reliability', both with a resolution of 250m and a 16-day interval.
- Map:** A satellite map shows the selected area in green. The map includes a scale bar, a home button, and a zoom control. The coordinates are displayed as 'Lat: -10.890 Lon: -77.251'.

Figura 3.16: Descarga de datos EVI para la Cuenca de Mantaro

Fuente: Adaptado desde AppEEARS.

El porcentaje resultante del valor observado se sitúa entre los valores extremos (mínimo y máximo) en los años anteriores. Los valores más bajos y más altos, por lo tanto, indican condiciones del estado de la vegetación malas y buenas respectivamente.

Existen versiones anteriores del cálculo del VCI, basadas en el Índice normalizado NDVI, sin embargo en esta oportunidad se trabaja con el EVI, puesto que presenta algunas ventajas, como son, la no distorsión en la luz reflejada causada por las partículas en el aire, la no distorsión en la luz reflejada causada por la cobertura del suelo debajo de la vegetación, además de que el producto EVI no se satura en comparación en el NDVI cuando se presentan bosques tropicales y grandes cantidades de clorofila.

Con el fin de enmascarar los píxeles que se ven afectados por las interferencias atmosféricas, como las nubes y la capa de hielo y nieve, se utiliza la capa de garantía de calidad de confiabilidad de píxeles (QA) de MOD13Q1. Dicha capa clasifica la calidad del índice de vegetación en las siguientes categorías:

Tabla 3.6: Clasificación de sequías según los VCI.

Rango de fiabilidad de píxeles	Resumen QA
-1	Relleno/sin datos No procesado
0	Datos buenos Utilizar con confianza
1	Datos tolerables
2	Hielo/nieve Objetivo cubierto de hielo/nieve
3	Nublado Objetivo no visible, cubierto de nubes
4	Estimado Basado en series de tiempo históricas de MODIS

Fuente: Elaboración propia.

Los datos “buenos” y “tolerables” en las bandas de confiabilidad de píxeles, se aceptan como calidad suficiente y se consideran para el análisis. Por lo que se utilizan otros valores de filtro distintos a “0” y “1” para enmascarar los píxeles EVI.

Los datos descargados (EVI), fueron procesados con el Software RStudio, obteniéndose los Índices de Condición de Vegetación. Además se muestra la ausencia de píxeles en algunas imágenes, que corresponden a píxeles enmascarados, tal como se muestra en la siguiente imagen.

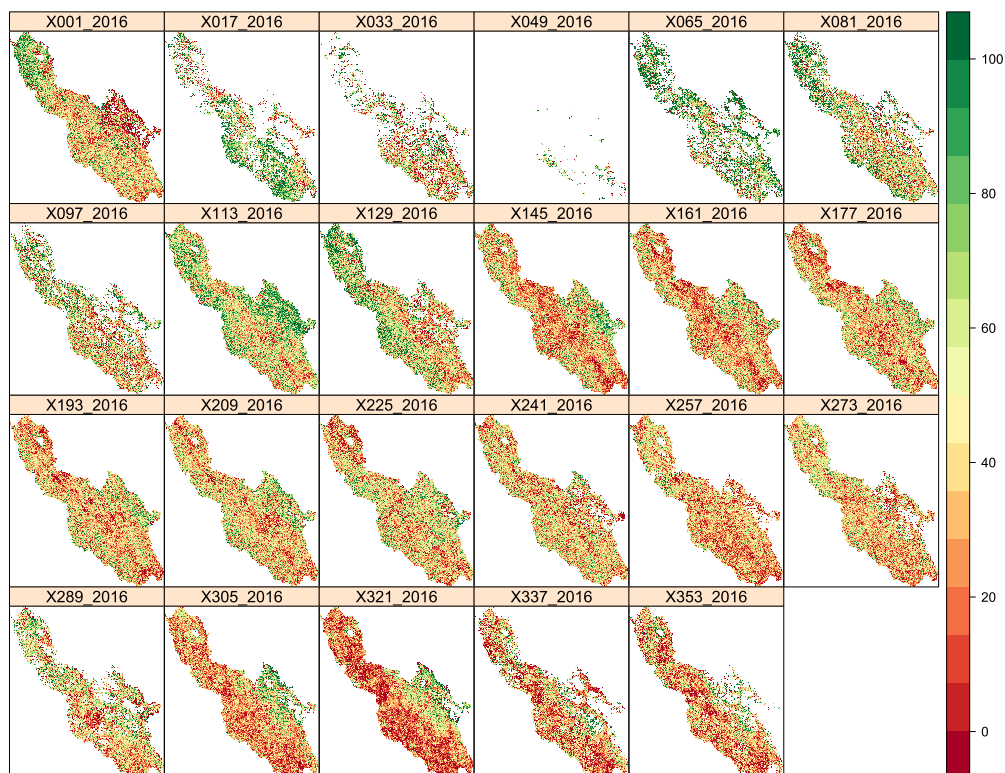


Figura 3.17: Índice de Condición de Vegetación (VCI) a partir de datos EVI, año 2016

Fuente: Elaboración propia.

3.9.7. Construcción del NDMI

La elaboración del NDMI, Índice de Humedad de Diferencia Normalizada, está basada en los datos de MODIS a una resolución espacial de 500 m. El producto MODIS que proporciona los datos de la “banda 1” hasta la “banda 7” es el MOD09A1.006 (Terra) y MYD09A1.006 (Aqua).

La obtención de los datos del producto MOD09A1, fueron de la página de la AppEEARS, Aplicación para extraer y explorar muestras preparadas para análisis perteneciente a la USGS, Servicio Geológico de los Estados Unidos, al igual que para la obtención del EVI. De esta página se obtiene la reflectancia de las bandas NIR y SWIR que para el sensor MODIS vendrían a ser las “bandas 2” y la “banda 6” respectivamente, tal y como se muestra en la siguiente imagen.

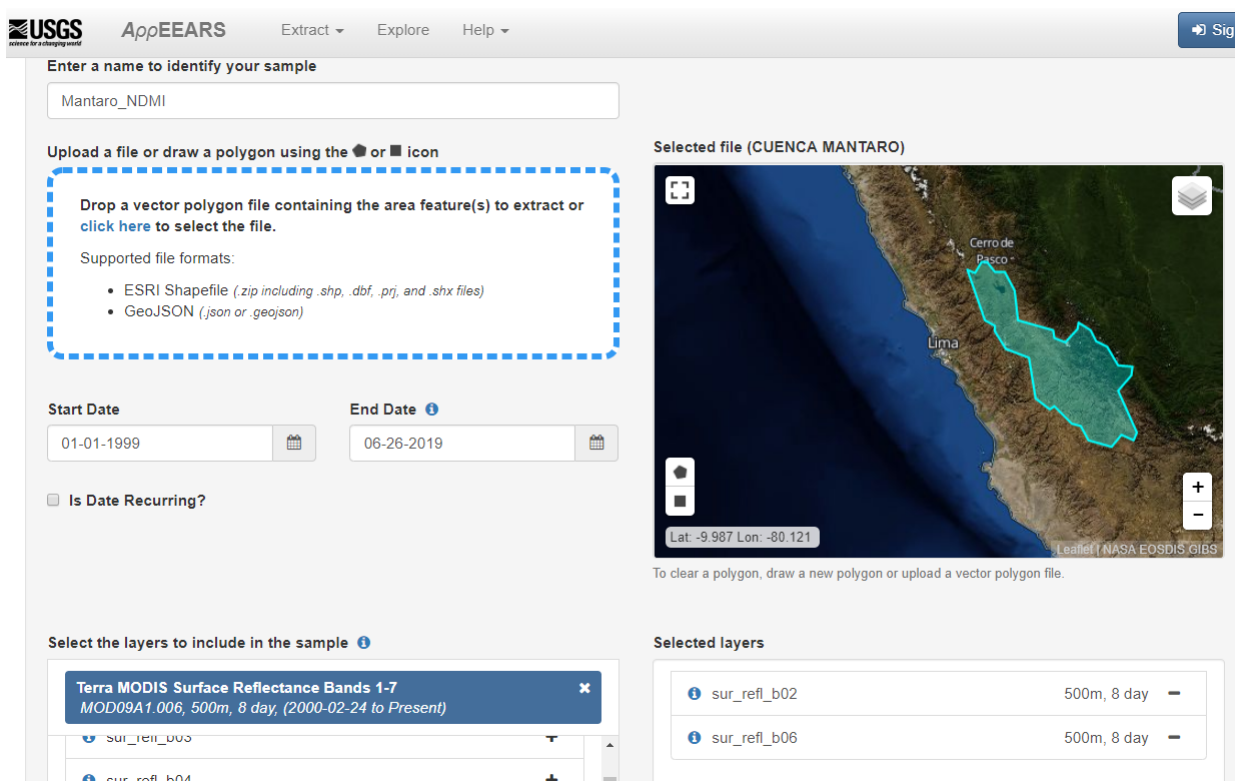


Figura 3.18: Obtención de las bandas 2 y 6 para la construcción del NDMI.

Fuente: Adaptado desde AppEEARS.

De igual forma que la construcción del EVI, se realiza la construcción del NDMI utilizando el software Rstudio, se realiza restando la reflectancia de las bandas (B2-B6) y dividiéndola entre la (B2+B6). El resultado del NDMI, son imágenes con valores que van desde -1 a 1 y que son utilizadas para medir la cantidad de humedad que posee la vegetación además del nivel de saturación que posee el suelo. Los resultados son imágenes ploteadas con el oftware Rstudio, para todos los años a partir del año 2000.

Para la obtención del NDMI a partir de las bandas 2 y 6 se utilizó el modelo siguiente:

$$NDMI = \frac{(\rho S_{NIR} - \rho S_{SWIR})}{(\rho S_{NIR} + \rho S_{SWIR})} \quad (3.9.5)$$

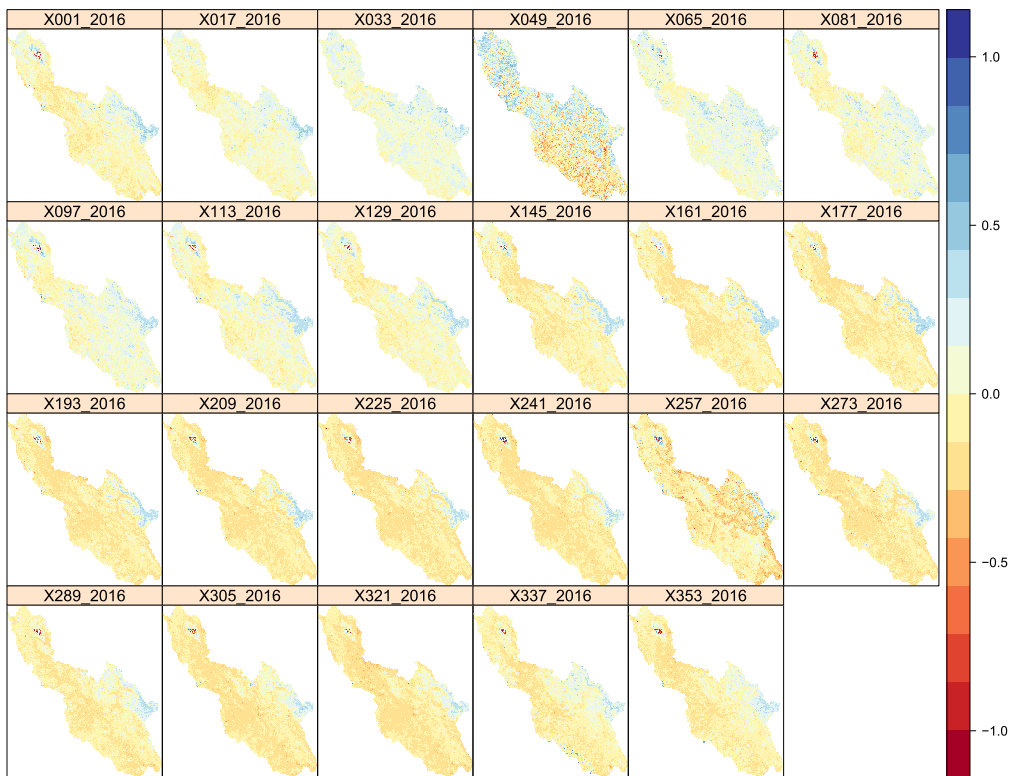


Figura 3.19: Obtención del NDMI con ayuda del software RStudio, año 2016

Fuente: Elaboración propia.

El NDMI logró mostrar un nivel de detalles muy alto, lo cual permitió localizar el punto exacto donde la humedad se vio más afectada, lo que nos da cuenta del gran potencial que representa este índice. Sin embargo, existen algunos pixeles que permanentemente se ven secos, esto debido a que pueden tener una carencia de cobertura vegetal. Se realizó un acercamiento de los resultados del NDMI al área correspondiente a la ciudad de Huancayo,

en una fecha donde se detectó sequías severas en la cuenca del Mantaro, tal como se muestra en la siguiente imagen.

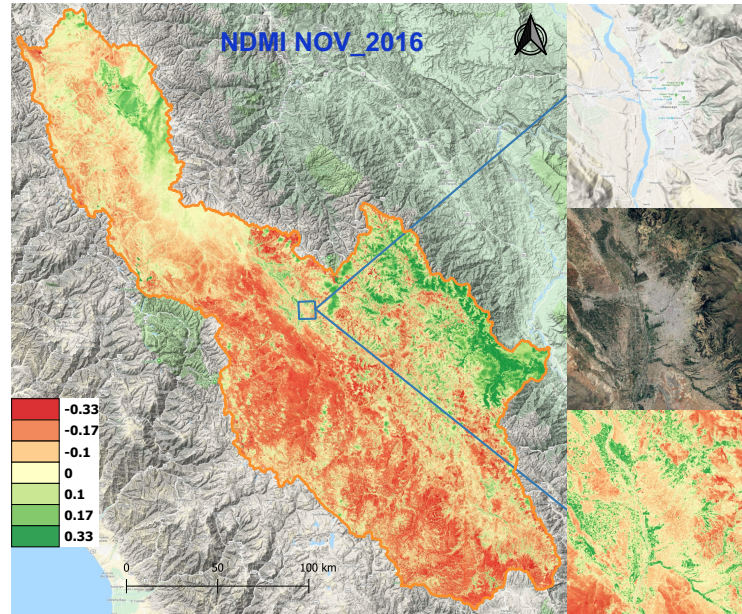


Figura 3.20: NDMI cuenca del Mantaro, Zoom ciudad de Huancayo

Fuente: Elaboración propia.

3.9.8. Evaluación de la calidad de los resultados

Obtenido anteriormente los índices de sequía, se procede con el análisis de correlación para la determinación de la validez de éstos, a través del estadístico correlación de Pearson.

Las variables que se correlacionan, corresponden a los índices VCI, NDMI y SPI, con sus respectivas escalas temporales de 1,3,6,9 y 12 meses, haciendo un total de 7 índices.

Para la determinación de la correlación de Pearson se utilizó el siguiente modelo;

$$r = \frac{\sum_{i=1}^N (X_i - \bar{X})(Y_i - \bar{Y})}{\sqrt{\sum_{i=1}^N (X_i - \bar{X})^2 \sum_{i=1}^N (Y_i - \bar{Y})^2}} \quad (3.9.6)$$

donde:

$$-1 \leq r \leq 1$$

Su interpretación es la siguiente:

- Si $r = 0$ (asociación lineal nula) no existe relación entre las variables.
- Si $r = 1$ o -1 (asociación lineal perfecta)
- Cuando $r > 0$ (correlación positiva) existe una relación directa entre las variables.

- Cuando $r < 0$ (correlación negativa) existe una relación inversa entre las variables.

En la siguiente figura se muestra las correlaciones entre todos los índices, obteniendo mejores correlaciones (0.63, 0.57, 0.48) entre el VCI y los índices SPI_06, SPI_09 Y SPI_12 meses respectivamente, razón por la que se considera como índice patrón.

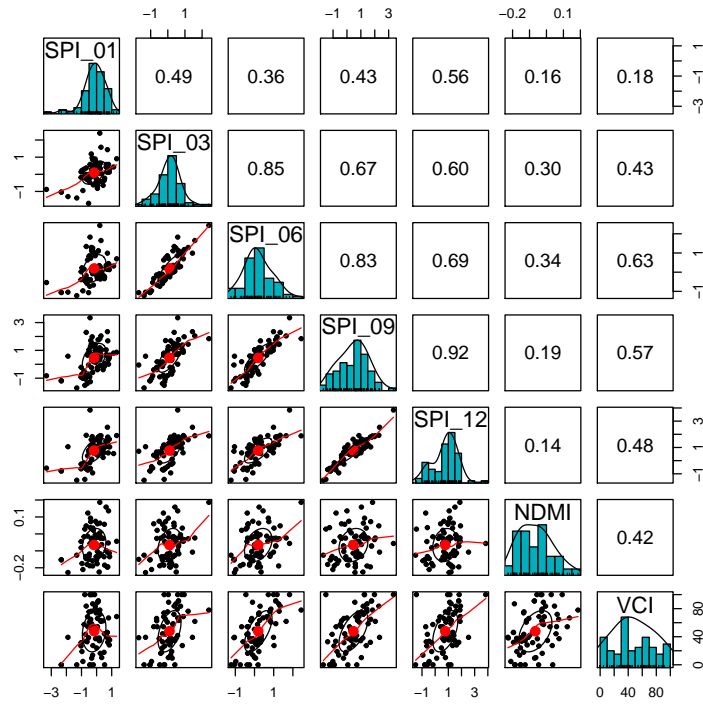


Figura 3.21: Correlación entre los índices de sequía VCI, NDMI y SPI para sus distintas escalas de tiempo.

Fuente: Elaboración propia.



4 RESULTADOS

4.1. Contrastación de hipótesis

4.1.1. Persistencia de Eventos

(McKee, Doesken, & Kleist, 1993), sugiere la detección de eventos de sequías basados en la intensidad del evento y la persistencia en meses del mismo, considera el evento de sequía cuando inician condiciones moderadamente secas, no especifica un tiempo en particular de persistencia para considerar un evento, sino que menciona la continuidad en valores inferiores a -1. No obstante tomando elementos como los mencionados en el estudio realizado en Fort Collins, Colorado por (McKee, Doesken, & Kleist, 1993) la persistencia juega un papel determinante e incide directamente en el impacto; en base a estos elementos en la presente investigación se tendrán en cuenta 2 tipos de eventos, los cuales dada su persistencia e intensidad podrían mencionarse como extremos.

La elaboración de mapas de persistencia inicia con la clasificación de los índices correspondientes a cada mes, la escala a clasificar queda a criterio del evaluador y da como resultado imágenes binarizadas con “1” y “0”, que representan pixeles que cumplen con la desigualdad planteada y otros que no, respectivamente. La clasificación se realizó con ayuda de la calculadora raster del programa QGIS 3.4.

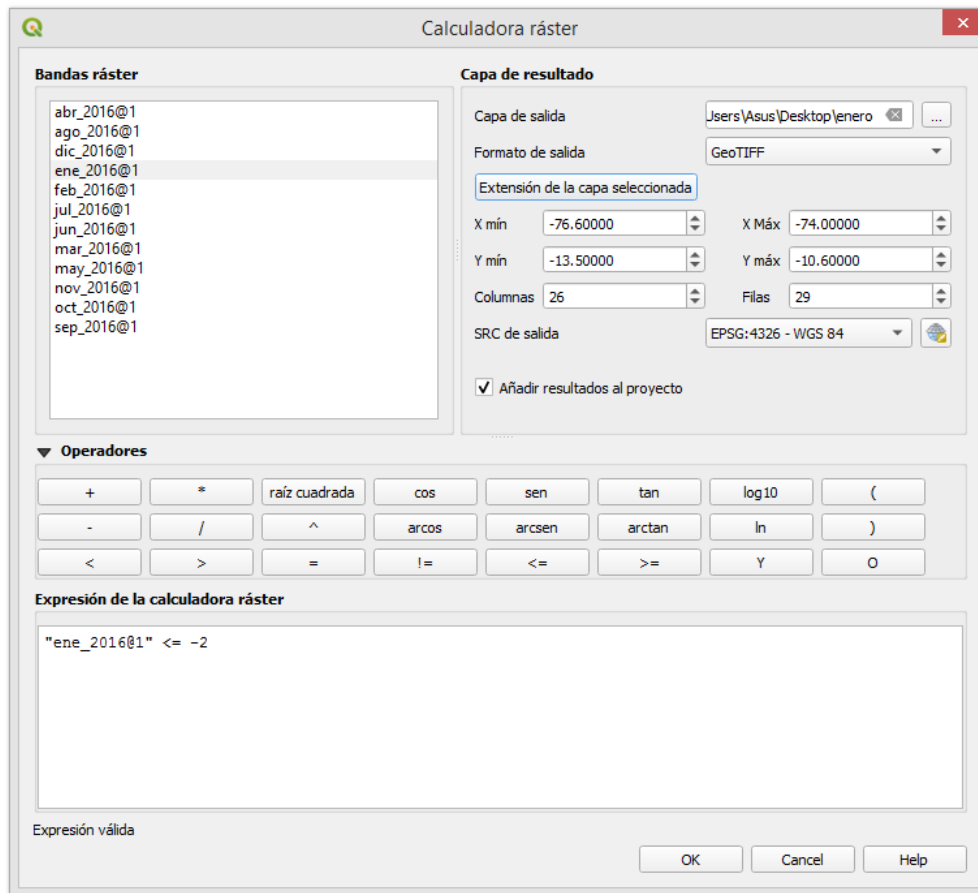


Figura 4.1: Clasificación de píxeles del SPI menores a -2.

Fuente: Elaboración propia.

Una vez realizada la binarización de los píxeles de todos los meses del año, se realiza la suma de estos de tal forma de obtener el gráfico de persistencia para un año e índice determinado. La elaboración del gráfico de persistencia también se realiza con la ayuda de la calculadora raster del software QGIS, tal como se muestra en la siguiente imagen.

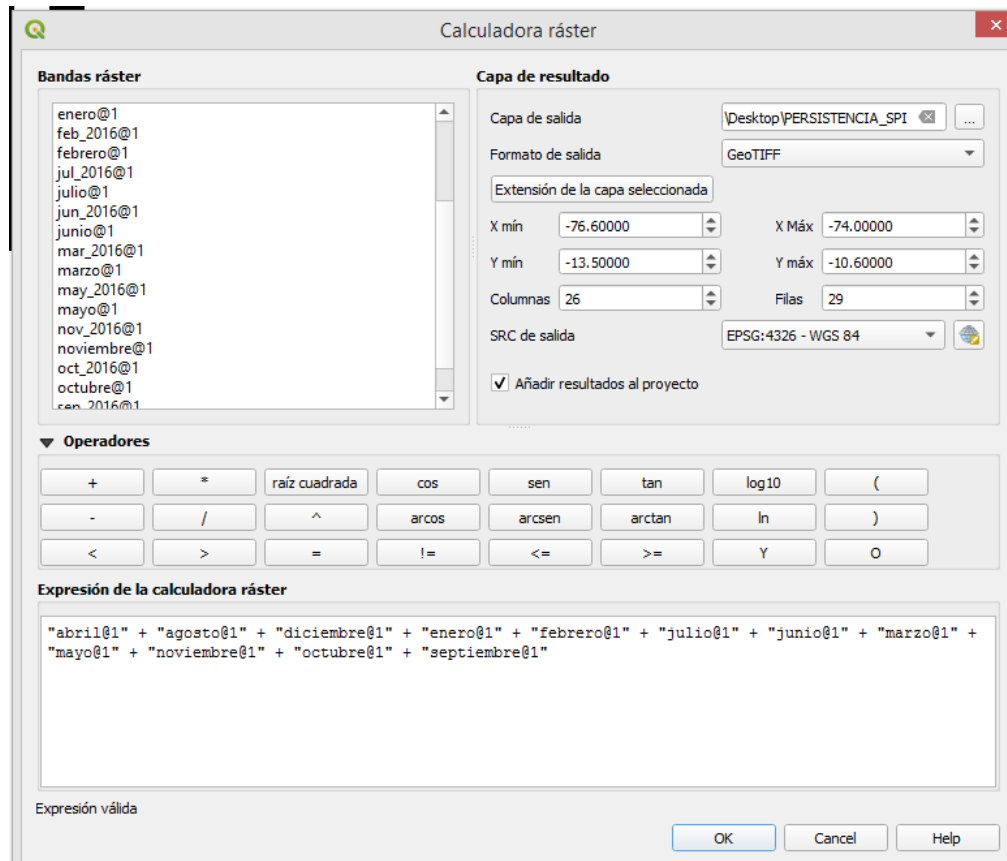


Figura 4.2: Obtención de gráficos de persistencia.

Fuente: Elaboración propia.

debido a que se busca evaluar eventos en cuatro años, se elaboran mapas de persistencia para cada uno a los cuatro años a evaluar. Cada uno de los mapas muestra la cantidad de meses que un pixel mantuvo o no una persistencia de condición seca.

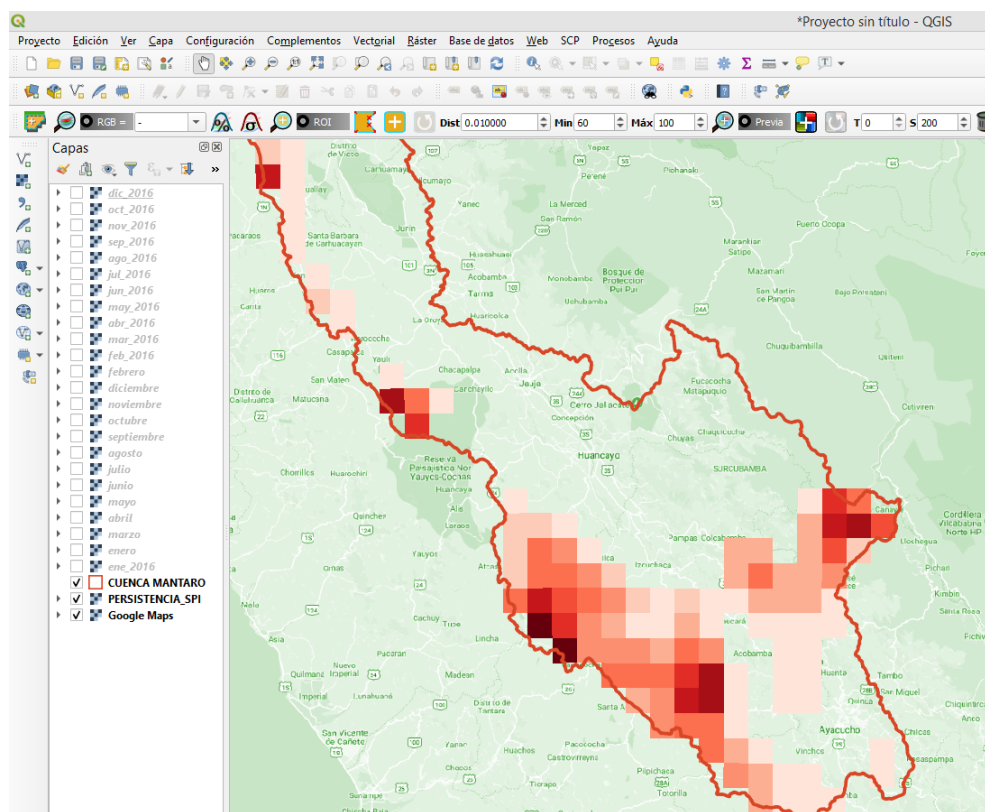


Figura 4.3: Obtención de gráficos de persistencia.

Fuente: Elaboración propia.

4.1.2. Evaluación comparativa eventos 2015, 2016, 2017 y 2018

Estimados los mapas de persistencia para cada uno de los años, se muestra una síntesis de eventos, extremos, moderados y normales detectados en los últimos cuatro años y presentados en una tabla, la cual permite hacer una comparación entre la detección integrada y la individual de cada índice en torno al período detectado; así mismo se muestra elementos como la persistencia e intensidad de los distintos eventos.

Tabla 4.1: Evaluación comparativa, último cuatro años

Evento	Periodo De detec- ción Inte- grado	Período detectado de forma individual			Detección Completa (C) Parcial (P)			Intensidad $\leq -2.0(A) \leq -1.0(B)$ $\leq 0.2(X) \leq 0.3(Y)$ $\leq -0.2(L) \leq -0.1(S)$			Asociado con reporte			
		SPI	VCI	NDMI	SPI	VCI	NDMI	SPI	VCI	NDMI				
		2015	01/15	01/15	02/15	01/15								
		-	-	-	-	C	P	C	B	Y		L	NO	
	12/15	12/15	12/15	12/15										
2016	01/16	03/16	03/16	01/16										
-	-	-	-	P	P	C	A	X	L	SI				
	12/16	12/16	12/16	12/16										
2017	01/17	02/17	07/17	03/17										
-	-	-	-	C	P	P	B	X	L	NO				
	12/17	12/17	12/17	12/17										
2018	01/18	01/18	06/18	02/18										
-	-	-	-	P	P	P	B	X	L	SI				
	12/18	02/18	12/18	12/18										

Fuente: Elaboración Propia.

A continuación, se muestra de manera complementaria los mapas de cada uno de los índices utilizados para algunos eventos dados entre el 2015-2018. En los mapas es posible visualizar de manera más clara el aporte de cada índice de la detección de sequías.

El evento del año 2016, clasificado como severo según el SPI (≤ -2.0), si bien muestra bastante coincidencia entre los tres índices utilizados, la detección mediante el uso integrado se ve mejorada; soportada en que la detección al analizar la cobertura temporal bajo los parámetros del SPI y el índice integrado, el último muestra una mejora de 2 meses, además de aumentar la precisión en cuanto a la cobertura espacial, dando detalles de lugares que no fueron detectados como severos por el SPI pero sí por el conjunto integrado.

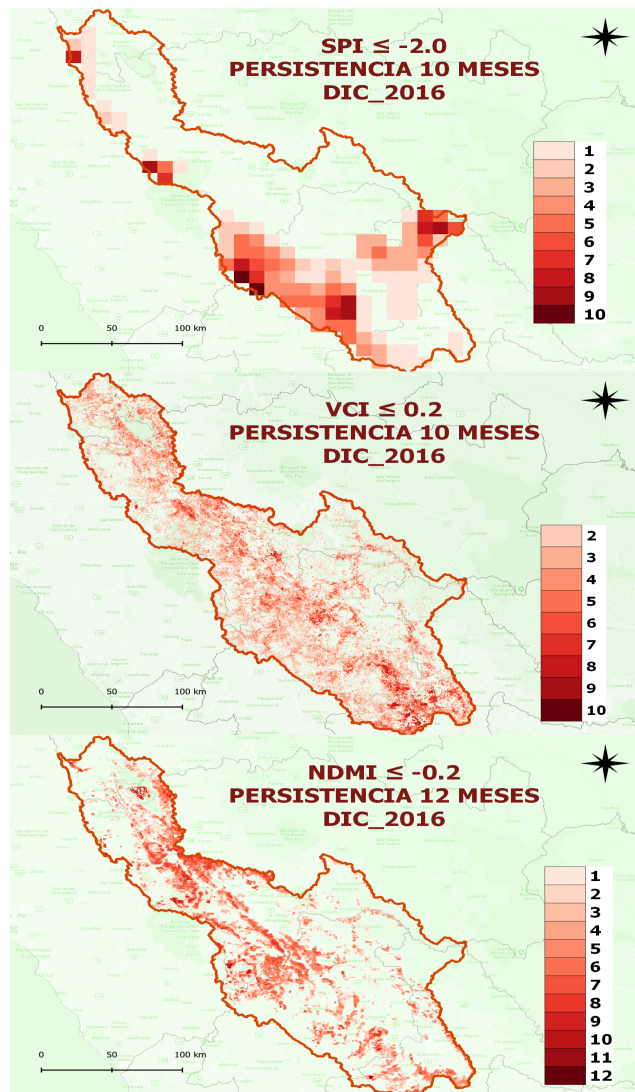


Figura 4.4: Mapa de Persistencia, evento severo detectado en la cuenca Mantaro, 2016

Fuente: Elaboración propia.

La figura 4.5, muestra el evento considerado de menor intensidad entre los cuatro años evaluados, según se muestra en la tabla compartiva. clasificado como un evento de leve a moderado por el VCI y como un año normal por el SPI, sin embargo, dentro de la escala evaluada, el índice integrado lo clasifica como un evento persistente en cuanto a duración en meses en ciertas sectores de la cuenca.

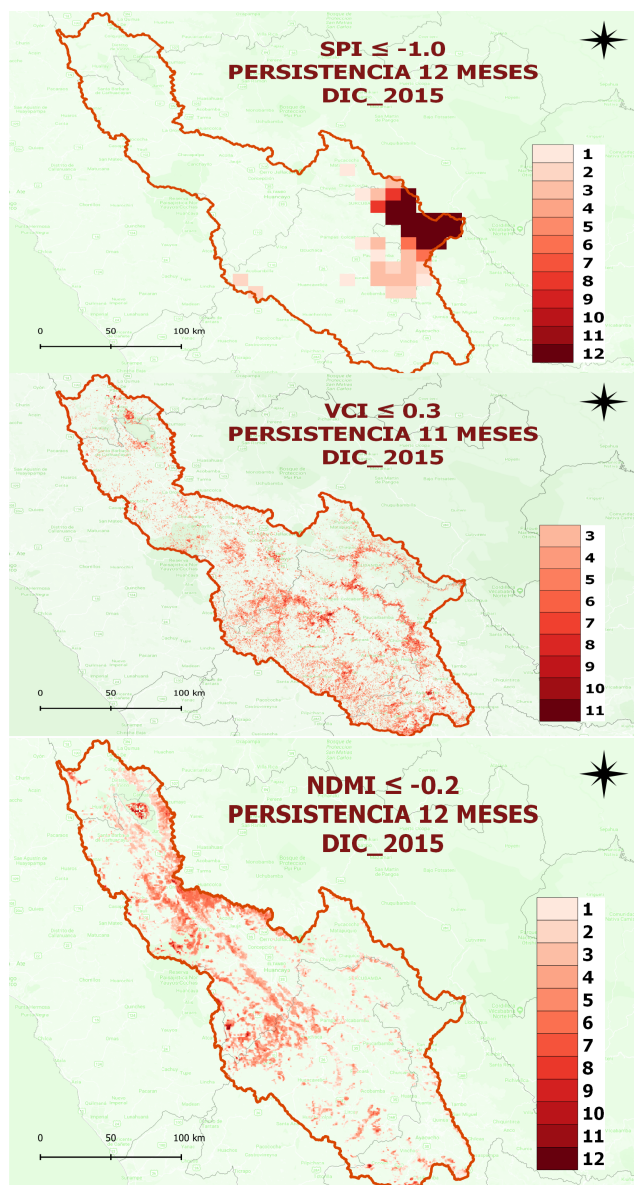


Figura 4.5: Mapa de Persistencia, evento normal para la cuenca del Mantaro, Ene-Dic 2015

Fuente: Elaboración propia.

La figura 4.6, muestra los resultados de dos eventos bastante similares en cuanto a la clasificación del VCI y el NDMI. El evento del año 2017 es clasificado como moderado por el SPI y como normal por el VCI y NDMI, mientras que el evento del año 2018 es clasificado como normal por el SPI y moderado en ciertas zonas afectadas por el VCI, por lo que aparentemente el evento del año 2017 fue de mayor intensidad respecto del año 2018; sin embargo, prensa y registros del “INDECI” reportan sequías moderadas en la cuenca del Mantaro para el año 2018 más no así para el año 2017. Por lo que se concluye que el Índice integrado mejora la evaluación de sequías respecto al uso de sólo el SPI, el cual no registró ningún evento de sequía para el año 2018.

La evaluación mediante el índice integrado nos da a conocer al 2018 como un año de mayor intensidad y persistencia de sequías respecto al año 2017; soportado en que dos de los tres índices, detectan en ciertas zonas de la cuenca sequías moderadas para el evento del año 2018.

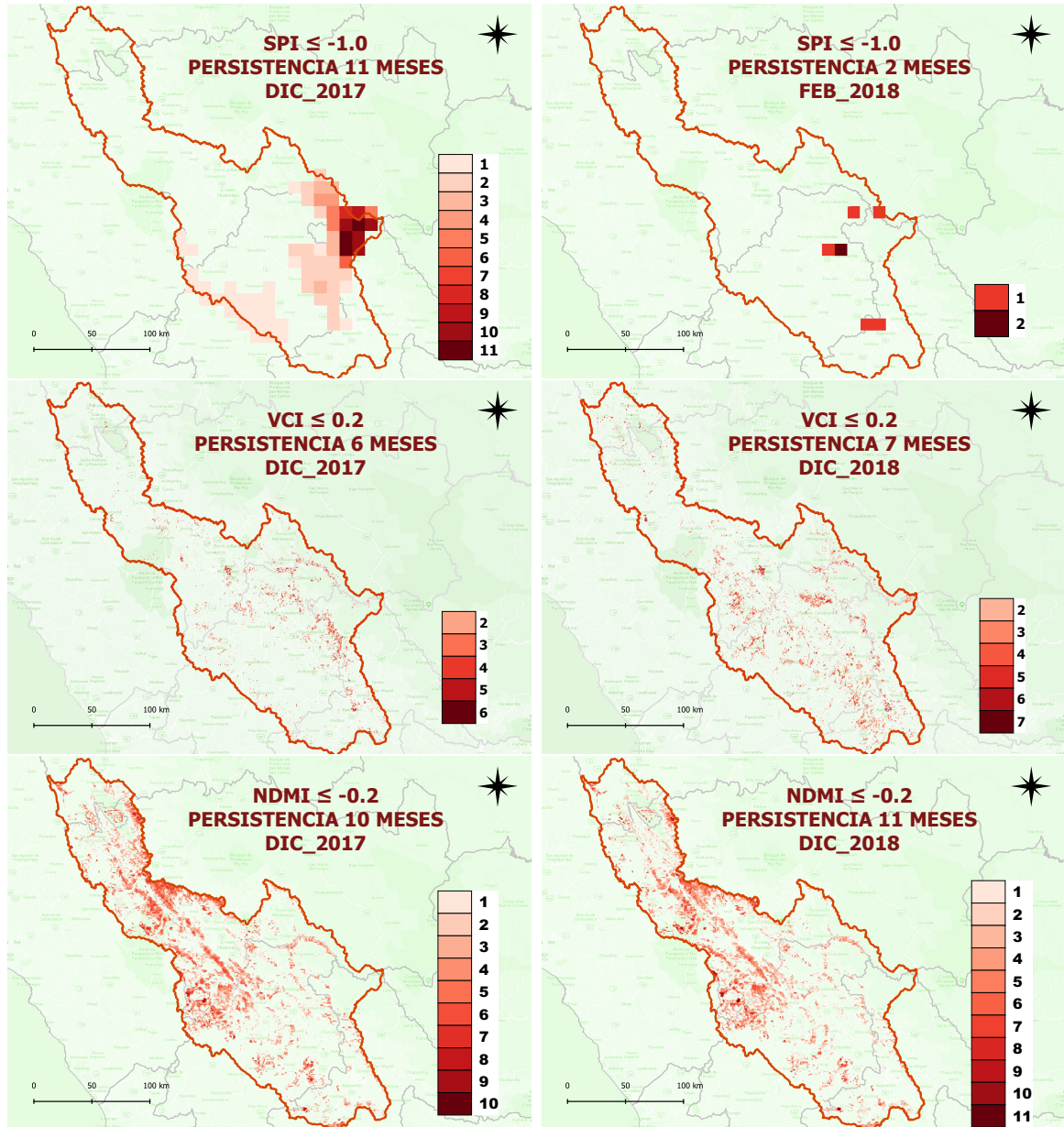


Figura 4.6: Mapa de Persistencia, eventos similares para la cuenca del Mantaro, 2017, 2018

Fuente: Elaboración propia.

4.2. Análisis e interpretación

El uso combinado de múltiples índices de sequía, obtenidos mediante satélites, demuestra una mejora en la detección de sequía en comparación con el uso de sólo un índice (SPI); debido a que muestra una variación en la cobertura temporal y espacial, logrando una mejora en la detección de eventos de sequía. Adicionalmente la hipótesis se refuerza al evaluar el evento del año 2018, en donde el SPI no es capaz de mostrar sequías moderadas en la cuenca, las cuales si fueron constatados y registradas por el Instituto Nacional de Defensa Civil-INDICE, por otro lado, los índices NDMI y en especial el VCI sí muestran sequías moderadas en algunos sectores de la cuenca producidas a finales de año. Toda esta afirmación sobre sequía moderadas en ciertos sectores de la cuenca del río Mantaro para el año 2018, se soporta en diarios de esa época, donde se registra riegos de sequía y ausencia de precipitaciones.



5 CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES

5.1. Conclusiones

- Puesto que cada índice se asocia a una variable hidrológica, vegetación y humedad, su uso combinado permite suplir limitantes particulares de cada índice, logrando detectar un número de eventos más completo, las cuales pueden ser de gran aporte en cuencas como la de este estudio que buscan fortalecer su red de información. Soportado en registros y diarios de la época, es posible aprobar la hipótesis que indica que de usarse múltiples índices de sequía, se puede mejorar la detección lograda con un solo índice.
- El SPI no posee cobertura a escala regional, muy posiblemente debido a la falta de estaciones distribuidas a lo largo de la región.
- El uso de los índices VCI y NDMI son de gran utilidad en la detección de sequías, ya que dan detalles únicos en cuanto a la cobertura e intensidad del evento, en gran medida gracias a la resolución espacial de las imágenes.
- En la presente investigación, los mapas de persistencia muestran diferencias entre los índices de sequía para el año 2018, por lo tanto, se da a conocer el cuidado a tener en el uso de un solo índice.

5.2. Recomendaciones

A continuación, daremos algunas recomendaciones a fin de complementar la presente investigación.

- Los resultados se pueden utilizar como herramienta de monitoreo y detección de sequías regionales, como parte de un sistema regional de alerta temprana de sequías.
- La plataformas satelitales son el futuro en cuanto a la evaluación y monitoreo en distintos fenómenos entre los cuales también están las sequías reginales.

5.3. Trabajos futuros

- Evaluar sequías regionales, integrando mayor número de índices e indicadores, por ejemplo, considerando la evapotranspiración, de forma que se tenga en avance en los sistemas de alerta temprana de sequías regionales.

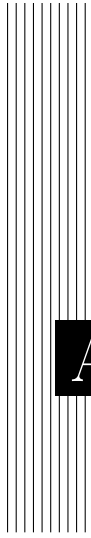


Referencias Bibliográficas

- Acuña, J. R., Llenque, J. C. E., Campos, E. R., and Juárez, R. N. Modelo de predicción del inicio de la sequía en el Perú usando el índice de vegetación procedente de imágenes de satélite e índices el Niño Oscilación Sur. *Revista de Investigación de Física*, 9(02).
- Ayala, I. A. (2016). Predicción de sequías con redes neuronales artificiales y algoritmos genéticos utilizando precipitación por percepción remota.
- Aybar, C. L., Fernández, C., Huerta, A., Lavado, W., et al. (2019). Construction of a high-resolution gridded rainfall dataset for Peru from 1981 to the present day. *Hydrological Sciences Journal*.
- Bajgain, R., Xiao, X., Wagle, P., Basara, J., and Zhou, Y. (2015). Sensitivity analysis of vegetation indices to drought over two tallgrass prairie sites. *ISPRS Journal of Photogrammetry and Remote Sensing*, 108:151–160.
- de Sequías, A. R. d. F. Guía metodológica para la aplicación del análisis regional de frecuencia de sequías basado en l-momentos y resultados de aplicación en América Latina.
- del Perú, I. G. (2005). Atlas climático de precipitación y temperatura del aire en la cuenca del río Mantaro. volumen I.
- Du, L., Tian, Q., Yu, T., Meng, Q., Jancso, T., Udvardy, P., and Huang, Y. (2013). A comprehensive drought monitoring method integrating MODIS and TRMM data. *International Journal of Applied Earth Observation and Geoinformation*, 23:245–253.

- Esparza Gil, J. et al. (2014). Contraste espacio-temporal de indicadores de interés hidrológico derivados desde teledetección.
- Fernández, B. (1997). Identificación y caracterización de sequías hidrológicas en Chile central. *Ingeniería del agua, 1997, vol. 4, núm. 4.*
- Gálvez, P. E. (2017). Caracterización de las sequías históricas y proyectadas bajo escenarios de cambio climático en la cuenca del río Mantaro.
- Jia, S., Zhu, W., Lü, A., and Yan, T. (2011). A statistical spatial downscaling algorithm of trmm precipitation based on ndvi and dem in the Qaidam basin of China. *Remote sensing of Environment, 115(12):3069–3079.*
- Lacruz, J. L. (2012). *Las sequías hidrológicas en la Península Ibérica: Análisis y caracterización espacio temporal, influencias climáticas y el efecto de la gestión hidrológica en un contexto de cambio global.* PhD thesis, Universidad de Zaragoza.
- Li, X., Zhang, Q., and Ye, X. (2013). Dry/wet conditions monitoring based on trmm rainfall data and its reliability validation over Poyang Lake basin, China. *Water, 5(4):1848–1864.*
- Liu, Z., Wang, Y., Shao, M., Jia, X., and Li, X. (2016). Spatiotemporal analysis of multiscalar drought characteristics across the Loess Plateau of China. *Journal of Hydrology, 534:281–299.*
- Marcos-García, P., López-Nicolas, A., and Pulido-Velázquez, M. (2017). Combined use of relative drought indices to analyze climate change impact on meteorological and hydrological droughts in a Mediterranean basin. *Journal of Hydrology, 554:292–305.*
- Mas, J. F. (2011). *Aplicaciones del sensor MODIS para el monitoreo del territorio.* Instituto Nacional de Ecología (INE-SEMARNAT).
- McKee, T. B., Doesken, N. J., Kleist, J., et al. (1993). The relationship of drought frequency and duration to time scales. In *Proceedings of the 8th Conference on Applied Climatology*, volume 17, pages 179–183. American Meteorological Society Boston, MA.
- Núñez, J. and Verbist, K. (2018). *Atlas de sequías de América Latina y el Caribe.* UNESCO Publishing.

- Rodríguez, J. A. C., Vergara, H., and Vanegas, D. X. (2016). Evaluación del nivel de mejora en el monitoreo de sequías a escala regional en Colombia, a partir de indicadores ecohidrológicos basados en teledetección. *Revista de Tecnología*, 15(2):15–42.
- Rojas, O., Vrieling, A., and Rembold, F. (2011). Assessing drought probability for agricultural areas in Africa with coarse resolution remote sensing imagery. *Remote sensing of Environment*, 115(2):343–352.
- Svoboda, M., Fuchs, B., et al. (2016). Handbook of drought indicators and indices.
- Svoboda, M., Fuchs, B., and Wood, D. (2012). Organización meteorológica mundial. *Índice normalizado de precipitación. Guía del usuario. OMM No 1090*.
- Valiente, Ó. M. (2001). Sequía: definiciones, tipologías y métodos de cuantificación. *Investigaciones geográficas*, (26):59–80.
- Velásquez, V. H. et al. (2005). Diagnóstico de la cuenca del Mantaro bajo la visión del cambio climático: Volumen ii.
- Wilhite, D. A. and Glantz, M. H. (1985). Understanding: the drought phenomenon: the role of definitions. *Water international*, 10(3):111–120.



A ANEXO 01.

Figura A.1: Matriz de Consistencia.

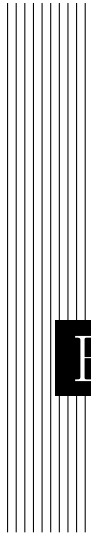
ANEXO 01: MATRIZ DE CONSISTENCIA

UNIVERSIDAD NACIONAL DE SAN CRISTOBAL DE HUAMANGA
FACULTAD DE INGENIERÍA DE MINAS , GEOLOGÍA Y CIVIL

TÍTULO DE LA TESIS: Evaluación de Sequías Regionales a Partir del Uso de Índices e Indicadores, Cuenca del Mantaro, 2018.
AUTOR: Juan Carlos Alarcón Sueldo

PROBLEMAS	OBJETIVOS	HIPÓTESIS	METODOLOGÍA	VARIABLES	INDICADORES	TÉCNICAS	INSTRUMENTOS	ESCALA DE
PROBLEMA GENERAL ¿Cómo es que el uso integrado de múltiples índices mejora la detección de sequías en la cuenca del Mantaro, mediante el uso integrado de índices de sequía, respecto al uso de sólo el SPI?	OBJETIVO GENERAL Evaluar la posible mejora en la detección de sequías en la cuenca del Mantaro, mediante el uso integrado de índices de sequía, respecto al uso de sólo el SPI.	HIPÓTESIS GENERAL El uso integrado de múltiples índices mejora la detección de sequías evaluadas en la cuenca del Mantaro, respecto al uso de sólo el SPI.	Tipo de investigación: investigación aplicada (genera beneficio y bienestar a la sociedad). Enfoque: Cuantitativo (porque las variables analizadas se miden en base a una magnitud y una unidad de medida). Alcance (o nivel): Relacional (Puesto que se tiene por finalidad conocer el grado de relación o asociación de se tiene entre diversos índices).	Dependiente: Las sequías.	Magnitud, intensidad, severidad.	Documentación		Ordinal
PROBLEMAS ESPECÍFICOS ¿Cuál es el nivel de aceptación que posee el SPI en cuanto a cobertura espacial ?	OBJETIVO ESPECÍFICO Determinar si el Índice de Precipitación estandarizado posee cobertura a escala regional.	HIPÓTESIS ESPECÍFICO El Índice de Precipitación estandarizado, aún no posee cobertura a escala regional.	Diseño de Investigación: No experimental. Descriptivo, donde se intenta evaluar distintos índices y medir el grado de interrelación entre ellos. Población y muestra: el muestreo es no probabilístico, por conveniencia.	Independiente: Índice de Precipitación Estandarizado .	Precipitaciones mensuales.	Observación, documentación	Registros	De intervalo
¿Por qué índices como el VCI y el NDMI, dan una visión más completa en la detección de sequías en la cuenca del Mantaro?	Evaluar la utilidad del índice VCI y NDMI en la detección de sequías en la cuenca Mantaro.	El uso complementario del índice VCI y el NDMI, son de gran utilidad en la detección de sequías en la cuenca del río Mantaro.	Temática y unidad de análisis: La unidad de análisis son los índices de sequía y la temática u objeto de estudio son las sequías. Delimitación espacial y temporal: cuenca hidrográfica del río Mantaro, año 1981-2018, para el producto PISCO y 2000-2018 para el producto MODIS.	Independiente: Índice de Humedad de Diferencia Normalizada.	NIR- infrarrojo cercano y la banda SWIR- infrarrojo corto.	Observación, documentación	Registros	De intervalo
¿Cuál de los cuatro años evaluados presenta coincidencia de eventos de sequías entre los distintos índices ?	Determinar coincidencias en la detección de sequías entre los distintos índices , a través de los mapas de persistencia, evaluados en cuatro años.	Los mapas de persistencias son de gran utilidad en la determinación de coincidencia de eventos de sequías entre los distintos índices.		Independiente: Índice de Condición de Vegetación.	Índice de Vegetación Mejorado- EVI.	Observación, documentación	Registros	De intervalo

Fuente: Elaboración propia.



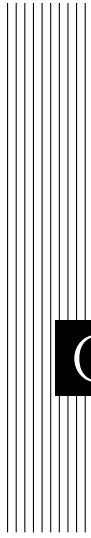
B ANEXO 02.

Emergencias :	Estados:	Del Año:	Ordenados Por:	Regiones:	Mostrar...	Imprimir
ACTIVAS ▼	Todos ▼	2018 ▼	Fecha ▼	AYACUCHO ▼		
EMERGENCIAS ORDENADAS POR FECHA						
Codigo	Fecha	Fenómeno	Departamento	Provincia	Distrito	Detalle
00097524	28/12/2018	VIENTOS FUERTES	AYACUCHO	HUAMANGA	S.JUAN BAUTISTA	
00097541	14/12/2018	VIENTOS FUERTES	AYACUCHO	LA MAR	SAMUGARI	
00097225	07/12/2018	SEQUIA	AYACUCHO	LUCANAS	HUAC-HUAS	
00097228	05/12/2018	SEQUIA	AYACUCHO	LUCANAS	S.PEDRO DE PALCO	
00097237	05/12/2018	SEQUIA	AYACUCHO	LUCANAS	SAN PEDRO	
00097248	05/12/2018	SEQUIA	AYACUCHO	LUCANAS	CARMEN SALCEDO	
00097249	05/12/2018	SEQUIA	AYACUCHO	LUCANAS	CHIPAO	
00097255	05/12/2018	SEQUIA	AYACUCHO	LUCANAS	SAN CRISTOBAL	
00097264	05/12/2018	SEQUIA	AYACUCHO	LUCANAS	SANTA LUCIA	
00097257	05/12/2018	SEQUIA	AYACUCHO	LUCANAS	LUCANAS	
00097259	05/12/2018	SEQUIA	AYACUCHO	LUCANAS	SAN JUAN	
00097260	05/12/2018	SEQUIA	AYACUCHO	LUCANAS	SAISA	
00097262	05/12/2018	SEQUIA	AYACUCHO	LUCANAS	LEONCIO PRADO	
00097227	05/12/2018	SEQUIA	AYACUCHO	LUCANAS	OTOCA	
00097232	05/12/2018	SEQUIA	AYACUCHO	LUCANAS	PUQUIO	
00097239	05/12/2018	SEQUIA	AYACUCHO	LUCANAS	SANCOS	
00097243	05/12/2018	SEQUIA	AYACUCHO	LUCANAS	CHAVIÑA	
00097088	05/12/2018	SEQUIA	AYACUCHO	HUAMANGA	TAMBILLO	
00097156	05/12/2018	SEQUIA	AYACUCHO	SUCRE	QUEROBAMBA	
00097157	05/12/2018	SEQUIA	AYACUCHO	SUCRE	BELEN	
00097162	05/12/2018	SEQUIA	AYACUCHO	SUCRE	CHALCOS	
00097165	05/12/2018	SEQUIA	AYACUCHO	SUCRE	CHILCAYOC	
00097167	05/12/2018	SEQUIA	AYACUCHO	SUCRE	S.SALVADOR DE QUIJE	
00097171	05/12/2018	SEQUIA	AYACUCHO	SUCRE	PAICO	
00097177	05/12/2018	SEQUIA	AYACUCHO	SUCRE	S. DE PAUCARAY	
00097183	05/12/2018	SEQUIA	AYACUCHO	SUCRE	MORCOLLA	
00097180	05/12/2018	SEQUIA	AYACUCHO	SUCRE	S.PEDRO DE LARCAY	
00097186	05/12/2018	SEQUIA	AYACUCHO	SUCRE	HUACAÑA	
00097188	05/12/2018	SEQUIA	AYACUCHO	SUCRE	SORAS	
00097251	04/12/2018	SEQUIA	AYACUCHO	LUCANAS	AUCARA	
00097252	04/12/2018	SEQUIA	AYACUCHO	LUCANAS	CABANA	
00097254	04/12/2018	SEQUIA	AYACUCHO	LUCANAS	S.A.DE HUAYCAHUACHO	
00097216	04/12/2018	SEQUIA	AYACUCHO	LUCANAS	OCAÑA	
00097219	04/12/2018	SEQUIA	AYACUCHO	LUCANAS	LLAUTA	
00097215	04/12/2018	SEQUIA	AYACUCHO	LUCANAS	LARAMATE	
00097109	03/12/2018	SEQUIA	AYACUCHO	LA MAR	TAMBO	
00097079	03/12/2018	SEQUIA	AYACUCHO	CANGALLO	M. P. DE BELLIDO	
00097075	02/12/2018	SEQUIA	AYACUCHO	CANGALLO	TOTOS	
00097294	02/12/2018	SEQUIA	AYACUCHO	VICTOR FAJARDO	CANARIA	
00097292	02/12/2018	SEQUIA	AYACUCHO	VICTOR FAJARDO	ASQUIPATA	
00097091	01/12/2018	SEQUIA	AYACUCHO	HUAMANGA	QUINUA	
00097080	01/12/2018	SEQUIA	AYACUCHO	HUAMANGA	ACOS VINCHOS	
00097083	01/12/2018	SEQUIA	AYACUCHO	HUAMANGA	PACAYCASA	
00097074	01/12/2018	SEQUIA	AYACUCHO	HUANCA SANCOS	SACSAMARCA	
00097078	01/12/2018	SEQUIA	AYACUCHO	HUANCA SANCOS	CARAPO	

<http://sinpad.indeci.gob.pe/sinpad/emergencias/mapa/ListadoEmergencias.asp?emerg=0&estado=0&ano=2018&ord=0®ion=00&slEmer=0&sl...> 1/2

Figura B.1: Listado de sequías año 2018

Fuente: Elaboración propia.



C ANEXO 03.

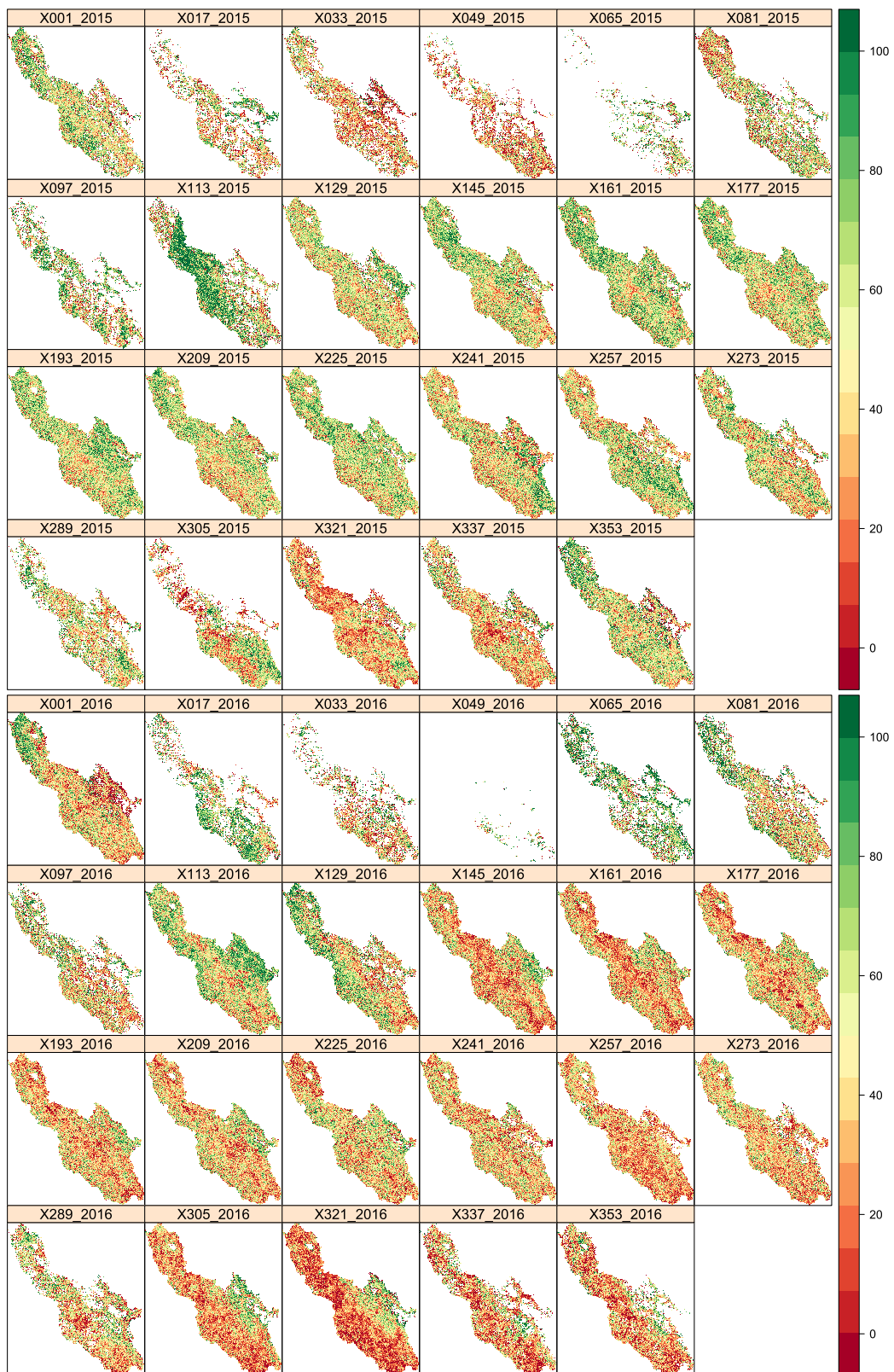


Figura C.1: Índice de Condición de Vegetación (VCI) a partir de datos EVI, 2015-2016
Fuente: Elaboración propia.

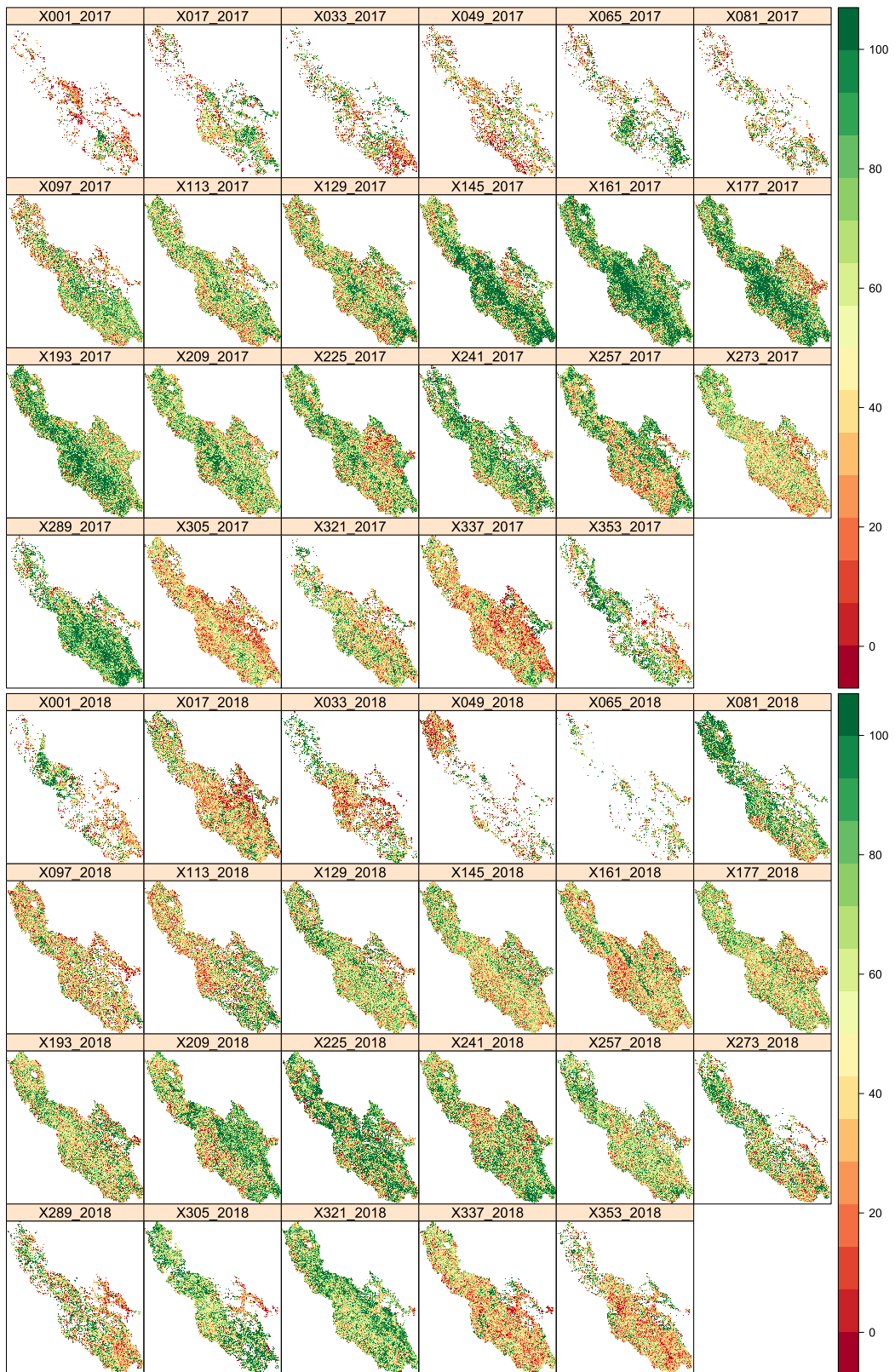


Figura C.2: Índice de Condición de Vegetación (VCI) a partir de datos EVI, 2017-2018

Fuente: Elaboración propia.

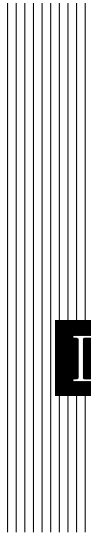
```

1 # instalando paquetes necesarios
2 install.packages("raster")
3 install.packages("rgdal")
4 install.packages("sp")
5
6 library(raster)
7 library(rgdal)
8 library(sp)
9
10 border <- shapefile("F:/MANTARO/shape/mantaro.shp")
11
12 path <- "F:/MANTARO/Data_EVI"
13 dlist <- dir(path,pattern="DOY")
14 path_c <- "F:/MANTARO/Data_Pixel_Reliability"
15 dlist_c <- dir(path_c,pattern="DOY")
16 path_jpg <- "F:/MANTARO/VCI_Maps_Mantaro_jpg"
17 path_tif <- "F:/MANTARO/VCI_Maps_Mantaro_tif"
18
19 pb <- txtProgressBar (min=0, max=length(dlist), style=1)
20 # barra de progreso a cargar: =====
21 setTxtProgressBar (pb, 0)
22
23 for (i in 1:length(dlist)) {
24   fold <- paste(path,dlist[i],sep="/")
25   fls <- dir(fold,pattern=".tif")
26   flsp <-paste(fold,fls,sep="/")
27
28   evistack <- stack(flsp)
29   eviresize<- crop(evistack,border)
30   evimask<-mask(eviresize,border)
31   evi<-evimask*0.0001
32   evi[evi==0.3]<-NA
33   evi[evi<0]<-NA
34
35   fold_c <- paste(path_c,dlist_c[i],sep="/")
36   fls_c <- dir(fold_c,pattern=".tif")
37   flsp_c <-paste(fold_c,fls_c,sep="/")
38   cloudstack <- stack(flsp_c)
39   cloudresize<- crop(cloudstack,border)
40   cloudmask<-mask(cloudresize,border)
41   cloudmask[cloudmask==(3)]<-NA
42   cloudmask[cloudmask==(2)]<-NA
43   cloudmask[cloudmask==(0)]<-1
44   cloudmask[cloudmask>(3)]<-NA
45
46   evi_c=evi*cloudmask | # multiplicando la pila de capas EVI por la pila de capas de confiabilidad de píxeles
47   # extrayendo el valor máximo y mínimo para cada píxel
48   evimax <- stackApply (evi_c, rep (1, nlayers (evi)), max, na.rm=T)
49   evimin <- stackApply (evi_c, rep (1, nlayers (evi)), min, na.rm=T)
50
51   VCI_all <- ((evi_c-evimin)/(evimax-evimin))*100 #calculando VCI
52
53   # definir las pausas y el esquema de color
54   my_palette <- colorRampPalette(c('#8B0000', '#FF4500', '#FFFF00', '#9ACD32', '#008000'))
55
56   fold_jpg <- paste(path_jpg)
57   fold_tif <- paste(path_tif)
58
59   for (k in 1:nlayers(VCI_all)) { # inicio del bucle for interno
60
61     year <- substr(fls[k],5,8)
62     doy <- substr(fls[k],1,3)
63
64     jpeg(filename=paste(fold_jpg,"/",doy,"_",year,".jpg",sep=""), quality = 100)
65
66     plot(VCI_all[[k]],
67          xlim=c(0,100),
68          col=my_palette(101),
69          main=paste("VCI", " (EVI)", " Sample ",doy," ",year,sep=""))
70
71     dev.off()
72
73     writeRaster(VCI_all[[k]], filename=paste(fold_tif,"/",doy,"_",year,".tif",sep=""), format="GTiff", overwrite=TRUE)
74     # escribe el geotiff y automatiza la denominación de archivos de acuerdo con el patrón DOY_YYYY
75
76   } # final del bucle for interno
77
78   setTxtProgressBar (pb, i)
79
80 } # final del for-loop exterior
81
82 par(mfrow = c(1,2))
83 plot(VCI_all, cex.axis=0.8, layout=c(12,5))
84
85 spplot(VCI_all, layout=c(12,2), col.regions=brewer.pal("RdYlGn"))
86 spplot(VCI_all, layout=c(12,2), col.regions=terrain.colors(100))
87 spplot(VCI_all, layout=c(12,2), col.regions=topo.colors(100))
88
89 library(RColorBrewer)
90 spplot(VCI_all, layout=c(12,2), col.regions=colorRampPalette(brewer.pal(11,"RdYlGn"))(100))

```

Figura C.3: Código en RStudio para obtener los VCI en formato raster a partir del EVI

Fuente: Elaboración propia.



D ANEXO 04.

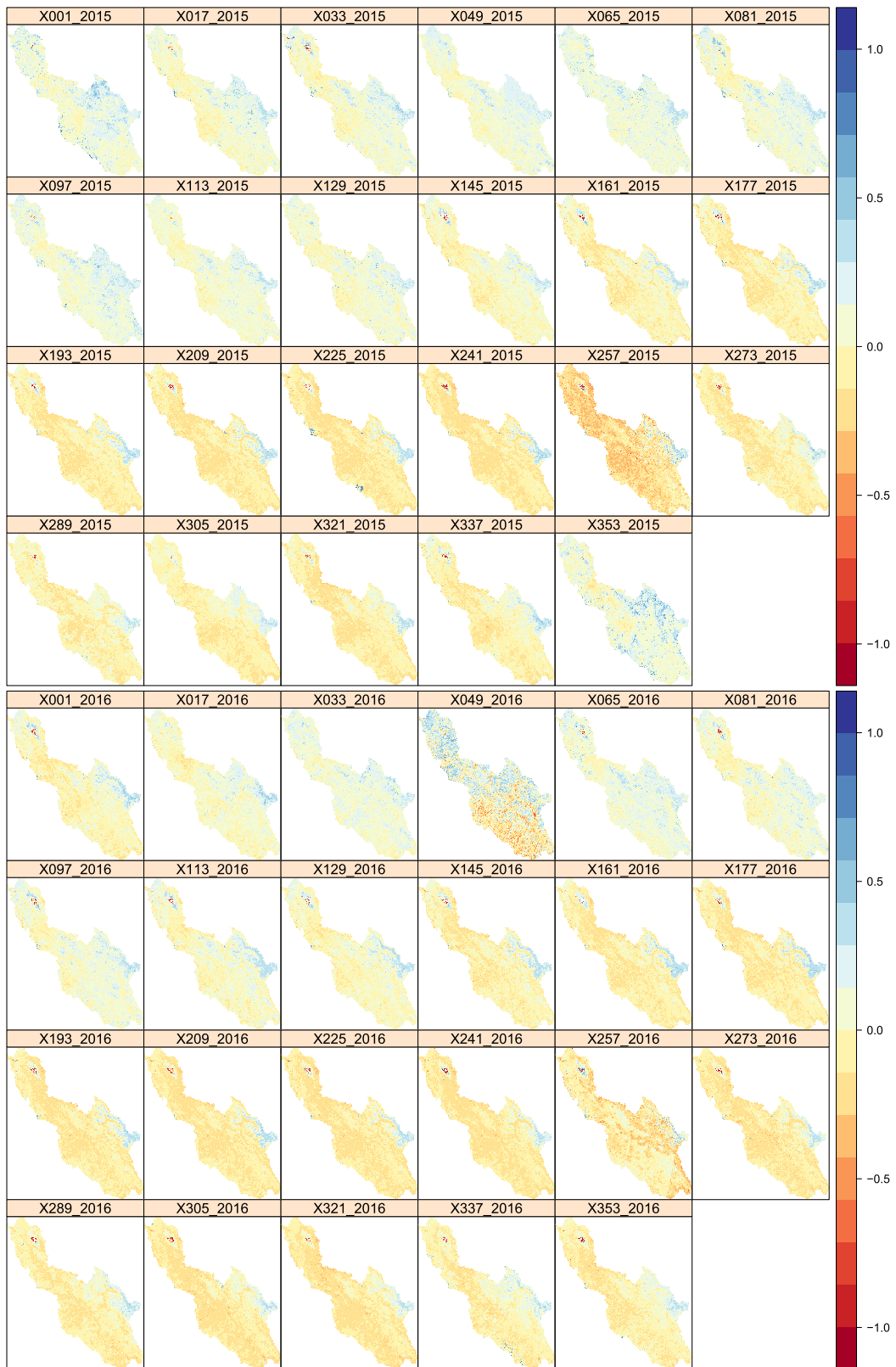


Figura D.1: Índice de Humedad de Diferencia Normalizada, NDMI, 2015-2016

Fuente: Elaboración propia.

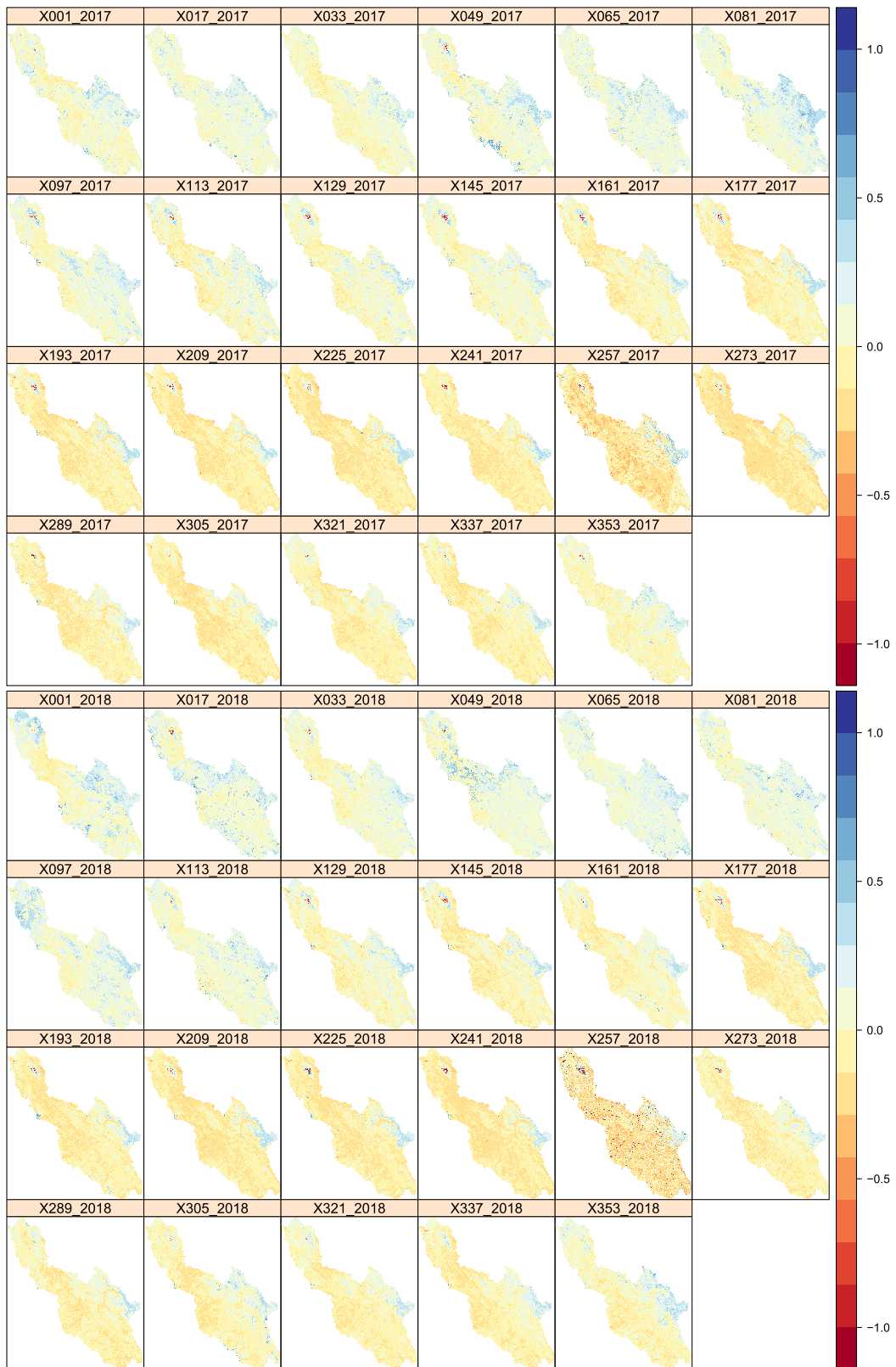


Figura D.2: Índice de Humedad de Diferencia Normalizada, NDMI, 2017-2018

Fuente: Elaboración propia.

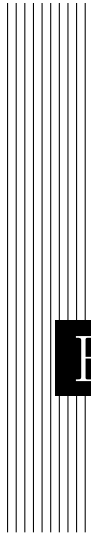
```

1 # instalando paquetes necesarios
2 install.packages("raster")
3 install.packages("rgdal")
4 install.packages("sp")
5
6 library(raster)
7 library(rgdal)
8 library(sp)
9
10 border <- shapefile("F:/NDMI/shape/mantaro.shp")
11
12 path <- "F:/NDMI/b2"
13 dlist <- dir(path,pattern="DOY")
14 path_c <- "F:/NDMI/b6"
15 dlist_c <- dir(path_c,pattern="DOY")
16
17 path_jpg <- "F:/NDMI/ndmi_jpg"
18 path_tif <- "F:/NDMI/ndmi_tif"
19
20 pb <- txtProgressBar (min=0, max=length(dlist), style=1)
21 # Barra de progreso a mostrar: =====
22 setTxtProgressBar (pb, 0)
23
24 for (i in 1:length(dlist)) { # inicio del bucle
25   fold <- paste(path,dlist[i],sep="/")
26   fls <- dir(fold,pattern=".tif")
27   flsp <- paste(fold,fls,sep="/")
28   evistack <- stack(flsp)
29   eviresize<- crop(evistack,border)
30   evimask<-mask(eviresize,border)
31   nir<-evimask*1
32
33   fold_c <- paste(path_c,dlist_c[i],sep="/")
34   fls_c <- dir(fold_c,pattern=".tif")
35   flsp_c <- paste(fold_c,fls_c,sep="/")
36   evistackr <- stack(flsp_c)
37   eviresizee<- crop(evistackr,border)
38   evimaske<-mask(eviresizee,border)
39   swir<-evimaske*1
40
41   VCI_all <- ((nir-swir)/(nir+swir)) #calculando NDMI
42   VCI_all[VCI_all<(-1)]<-NA
43   VCI_all[VCI_all>(1)]<-NA
44
45   # definir las pausas y el esquema de color
46   my_palette <- colorRampPalette(c('#8B0000', '#FF4500', '#FFFF00', '#9ACD32', '#008000'))
47
48   fold_jpg <- paste(path_jpg)
49   fold_tif <- paste(path_tif)
50
51
52   for (k in 1:nlayers(VCI_all)) {
53     year <- substr(fls[k],5,8)
54     doy <- substr(fls[k],1,3)
55
56     jpeg(filename=paste(fold_jpg,"/",doy,"_",year,".jpg",sep=""), quality = 100)
57     # escribe los mapas jpg y nombra los archivos automáticamente de acuerdo con el patrón DOY_YYYY
58
59     plot(VCI_all[[k]],
60         xlim=c(-1,1),
61         col=my_palette(101),
62         main=paste(" NDMI ", " Mantaro ",doy," ",year,sep=""))
63
64     dev.off()
65
66     writeraster(VCI_all[[k]], filename=paste(fold_tif,"/",doy,"_",year,".tif",sep=""), format="GTiff", overwrite=TRUE)
67     # escribe el geotiff y automatiza la denominación de archivos de acuerdo con el patrón DOY_YYYY
68
69   } # final del bucle for-interno
70
71   setTxtProgressBar (pb, i)
72
73 }
74
75
76
77 par(mfrow = c(1,2))
78 plot(VCI_all, cex.axis=0.8, layout=c(12,5))
79
80 spplot(VCI_all, layout=c(12,2), col.regions=brewer.pal("RdYlGn"))
81 spplot(VCI_all, layout=c(12,2), col.regions=terrain.colors(100))
82 spplot(VCI_all, layout=c(12,2), col.regions=topo.colors(100))
83
84 library(RColorBrewer)
85 spplot(VCI_all, layout=c(12,2), col.regions=colorRampPalette(brewer.pal(11,"RdYlGn"))(100))

```

Figura D.3: Código en RStudio para la obtención de imágenes del NDMI en formato raster

Fuente: Elaboración propia.



E ANEXO 05.

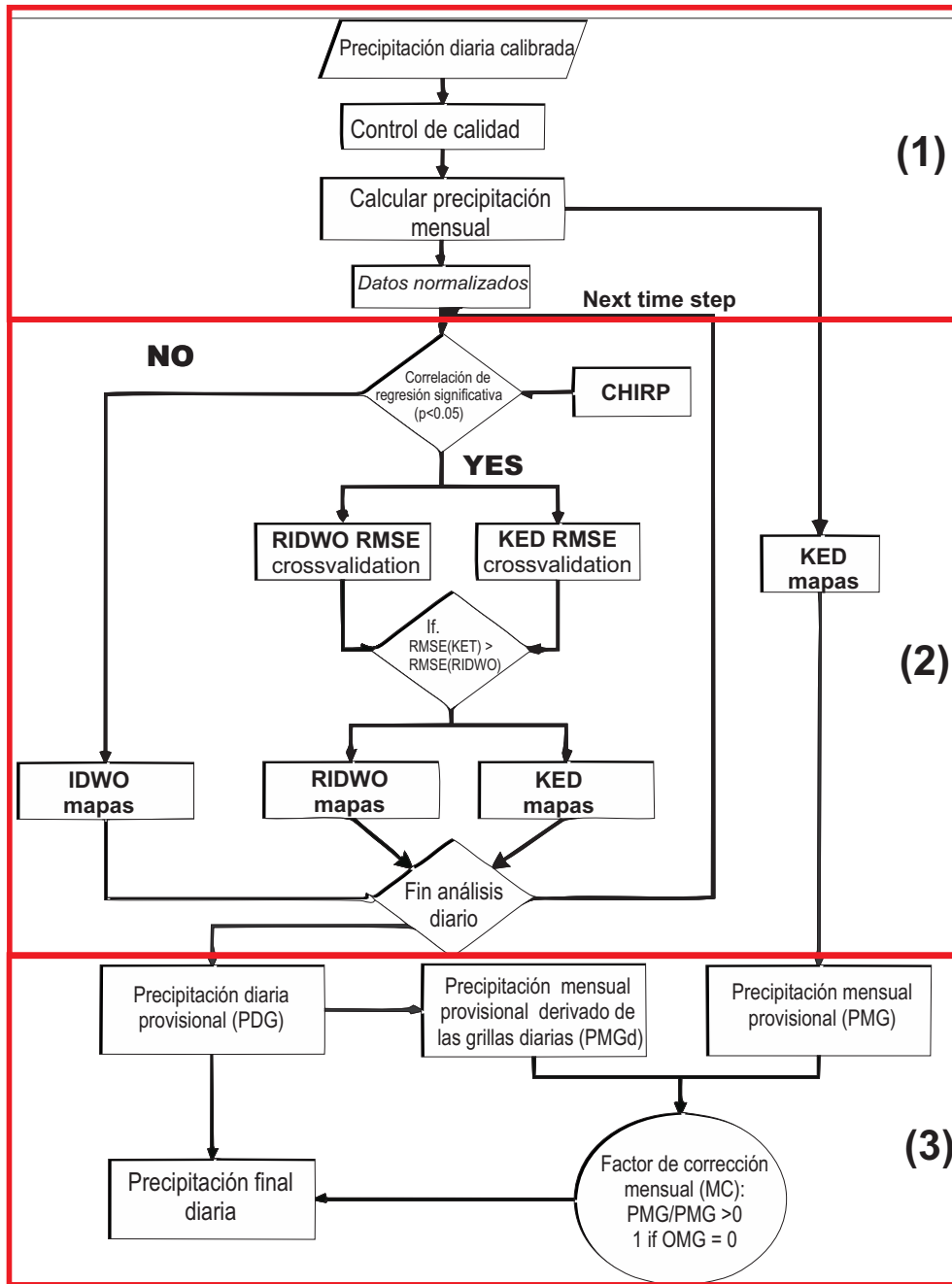


Figura E.1: Estructura de PISCO.

Fuente: Lavado et al. PISCO

1. Control de calidad / Normalización de datos.
2. Interpolación:
3. Corrección del BIAS.