

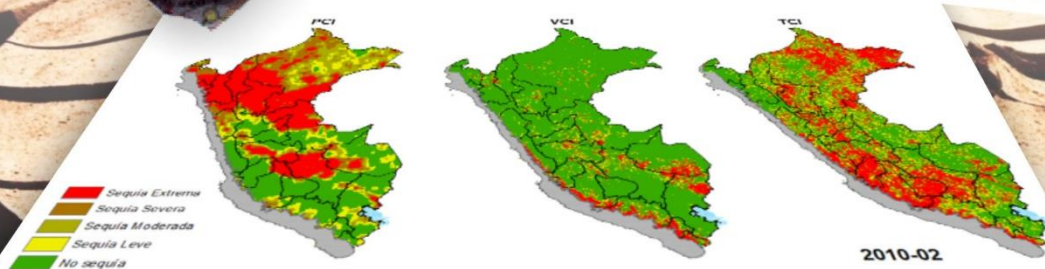
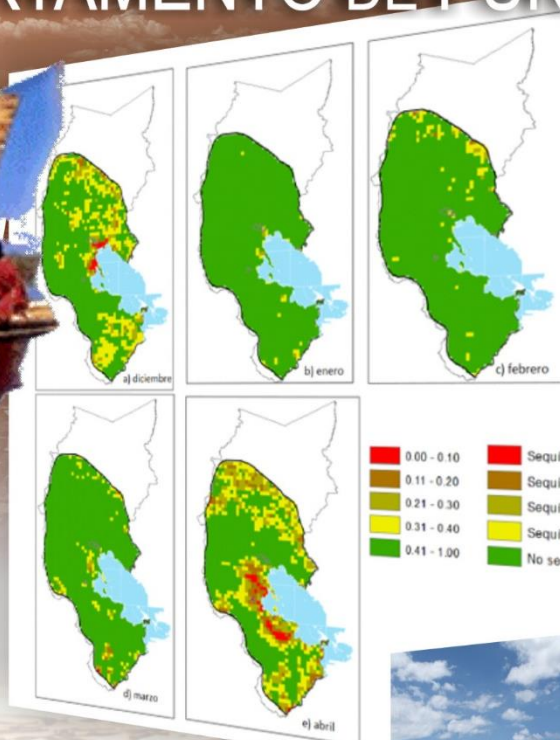


PERÚ

Ministerio
del Ambiente

Servicio Nacional de
Meteorología e Hidrología
del Perú - SENAMHI

VALIDACIÓN DE INDICADORES DE SEQUÍA UTILIZANDO SENSORAMIENTO REMOTO EN EL DEPARTAMENTO DE PUNO





PERSONAL DIRECTIVO

Ing. Amelia Díaz Pabló
Presidente Ejecutivo del SENAMHI

Ing. Esequiel Villegas Paredes
Director Científico del SENAMHI

Ing. Oscar G. Felipe Obando
Director de Hidrología y Recursos Hídricos del SENAMHI

PhD. Waldo Lavado Casimiro
Director de Hidrología Aplicada del SENAMHI

REVISOR DEL ESTUDIO

PhD. Waldo Lavado Casimiro
Director de Hidrología Aplicada del SENAMHI

RESPONSABLE DEL ESTUDIO

Sofía Marisol Endara Huanca
Especialista en Hidrología del SENAMHI

Lima-Perú
Noviembre 2015

Contenido

I. ASPECTOS GENERALES	5
1.1 Introducción	5
1.2 Antecedentes	6
1.3 Justificación	6
1.4 Objetivos	7
1.4.1 Objetivo General	7
1.4.2 Objetivos específicos	7
II. ZONA DE ESTUDIO.....	7
2.1 Ubicación	7
2.1.1 Ubicación geográfica	7
2.1.2 Ubicación política	7
2.2 Climatología.....	8
III. DATOS Y METODOLOGÍA.....	12
3.1 Datos de Precipitación observada e índices de sequía.....	12
3.1.1 Índice estandarizado de precipitación (SPI).....	14
3.2 Datos de sensoramiento remoto e índices de sequía	14
3.2.1 Datos MODIS.....	14
3.2.2 Precipitación TRMM.....	14
3.2.3 Índice de sequía de sensoramiento remoto	15
3.3 Análisis de SPI e índices de sequía de sensoramiento remoto	16
3.3.1 Análisis de correlación	16
3.3.2 Comparación espacial entre mapas de sensoramiento remoto.....	17
3.3.3 Índice de sequía integrado MIDI.....	17
3.3.4 Mapas de sequía MIDI y comparado con los índices de sequía in-situ.....	17
IV. RESULTADOS Y DISCUSIÓN	17
4.1 Correlaciones entre índices de sequía de sensoramiento remoto y el índice SPI ..	17
4.2 Correlación temporal entre índices de sequía de sensoramiento remoto y el SPI .	19
4.3 Comparación espacial de los índices de sequía de sensoramiento remoto	23
4.4 Mapas Índice de sequía óptimo MIDI.....	25
4.5 Comparación índice de sequía MIDI y con el SPI-3	26
V. CONCLUSIONES	29
VI. BIBLIOGRAFÍA	30
ANEXOS:	31

LISTA DE FIGURAS

Figura 1: Mapa de zona de estudio Región Puno y ubicación de estaciones meteorológicas.	8
Figura 2: Promedio de Temperatura mínima del aire multianual del departamento de Puno.	9
Figura 3: Promedio de Temperatura máxima del aire multianual del departamento de Puno.	10
Figura 4: Promedio de Precipitación multianual del departamento de Puno.	11
Figura 5: Estaciones meteorológicas	13
Figura 6: (a) Coeficientes de correlación entre los índices de sequía de sensoramiento.	20
Figura 6: (b) Coeficientes de correlación entre los índices de sequía de sensoramiento.	21
Figura 6: (c) Coeficientes de correlación entre los índices de sequía de sensoramiento.	22
Figura 6: (d) Coeficientes de correlación entre los índices de sequía de sensoramiento.	23
Figura 7: Comparación espacial de índices de sensoramiento remoto.	24
Figura 8: Cambios de condición de sequía para el periodo húmedo 2010 (diciembre 2009 – abril 2010), MIDI.	26
Figura 9: Cambios de condición de sequía para el periodo húmedo 2010 (diciembre 2009 – abril 2010), MIDI.	28

LISTA DE TABLAS

Tabla 1. Regiones de análisis y número de estaciones a usar.	12
Tabla 2. Datos de satélite utilizados y su descripción.	14
Tabla 3. Correlación entre índice de sequía de sensoramiento remoto y SPI a diferentes escalas de tiempo. Periodo 2001-2013. Los valores altos de correlación de cada fila y columna son mostradas en rojo $p\text{-value}<0.01$	18
Tabla 4. Pesos para la región del altiplano para PCI, TCI, y VCI.	25
Tabla 5. Descripción de los pesos para cada estación respecto al PCI, TCI, y VCI.	27

LISTA DE ANEXOS

Anexo 1: Esquema de clasificación de sequía	31
Anexo 2: Esquema metodológico del presente estudio.	32
Anexo 3: Mapas de sequía de sensoramiento remoto a nivel nacional.	33

RESUMEN

Los índices de sequía de teledetección estimados principalmente de bandas ópticas e infrarrojas, viene siendo utilizado en el seguimiento de la sequía agrícola. Sin embargo, su aplicación en el monitoreo de la sequía meteorológica es limitado. El presente estudio propone el uso del índice de sequía de sensoramiento remoto de múltiples sensores, Índice de sequía de microondas integrado (MIDI, por sus siglas en inglés) propuesta por Zhang (2013), para el monitoreo de la sequía a corto plazo. Integrando tres variables; El índice de condición de vegetación (VCI), índice de condición de precipitación (PCI) y el índice de condición de la temperatura (TCI). Los cuales, son evaluados para la vigilancia de la sequía en el Perú, estimados a partir de productos satelitales LST y NDVI (MOD13A3 y MOD11A2), el 3B42-RT TRMM calculado del índice de condición de precipitación. Así mismo, se utilizó información observada de la variable precipitación de la Red de estaciones del Servicio Nacional de Meteorología e Hidrología del Perú (SENAMHI) del periodo 1970 al 2013, para el cálculo del índice estandarizado de precipitación (SPI).

Para la validación de este índice MIDI se realizó varios procesos como, comparación espacial, correlación de Pearson entre el SPI y el MIDI por regiones climáticas, el cual se identificaron 9 regiones en el Perú y una de ellas la región de puno. Posteriormente se realizó la evaluación de pesos del VCI, TCI y PCI para la construcción del índice MIDI.

I. ASPECTOS GENERALES

1.1 Introducción

La sequía es uno de los peligros naturales más devastadores que paraliza la producción de alimentos, agota los pastizales, perturba los mercados y, en los casos más extremos, causa la muerte de personas y animales. Estudios recientes, muestran que la población expuesta a las sequías representa el 34% de la población en Ecuador, el 19% en Bolivia y de Colombia y el 10% en Perú. La población está expuesta a las sequías de manera directa e indirecta. El déficit de agua afecta a los cultivos a tal punto que puedan perderse las cosechas, especialmente en las regiones rurales altamente dependientes de los productos de la tierra. Cerca de 47% del total de áreas agropecuarias del Perú están expuestas a las sequías. En este contexto, es de gran importancia el monitoreo de sequías (CAN, 2007).

La sequía es considerada un fenómeno complejo por la Sociedad Meteorológica Americana, el cual la clasifica en cuatro categorías: sequía meteorológica, sequía agrícola, sequía hidrológica y sequía socioeconómica (Heim, 2002). La sequía meteorológica es un déficit de precipitación, la sequía agrícola es un déficit en la mezcla total de suelo, la sequía hidrológica es una disminución de los caudales durante un periodo de tiempo, y la sequía socioeconómica está asociada con la reducción de algunas bondades económicas afectadas por los procesos de sequías naturales (Heim, 2012; Keyantash and Dracup, 2012).

Debido a la poca información de observaciones de precipitación (estaciones pluviométricas), muchos autores utilizan datos de sensoramiento remoto para el monitoreo de sequías. Para la estimación de indicadores de sequía de sensoramiento remoto en el ámbito de estudio, se utilizó información satelital proveniente del Espectroradiómetro de imágenes de media resolución (MODIS), específicamente de los productos MOD11A2 y MOD13A3, temperatura en la superficie del suelo (LST) e Índice de vegetación de diferencia normalizada (NDVI) respectivamente. Mientras, para la precipitación estimada se utilizó datos del producto 3B42-rt del sensor de Misión de Medición de Lluvias tropicales (TRMM) para el cálculo de índice de condición de precipitación.

Los índices de sequía basada en observaciones in-situ puede estimar efectivamente las condiciones de sequía en la localidad de la estación y en su alrededor de la estación meteorológica. Sin embargo, la falta de continuidad de la distribución de la cobertura espacial de la estaciones, especialmente en áreas donde las estaciones meteorológicas son escasas o alto grado de variabilidad climática y espacial, en esos sentido, el uso de técnicas de sensoramiento remoto puede superar las limitaciones de las observaciones in-situ consistentemente y continuamente, el monitoreo de procesos ambientales de la tierra y cambios significativos en el espacio y en el tiempo. El detalle de las observaciones espaciales es adecuado para la orientación regional del monitoreo del fenómeno y detección. El índice de sequía basado en datos de sensoramiento remoto son por lo tanto, capaces de capturar los detalles espaciales y se han convertido en las más prestigiosas herramientas para el monitoreo de sequías a escala regional (Kogan, 1997).

1.2 Antecedentes

A diferencia de otros tipos de fenómenos naturales que originan efectos desastrosos en el Perú, las sequías son fenómenos cuyas manifestaciones son lentas y recurrentes en el tiempo. Las últimas investigaciones asocian la carencia de agua en algunos puntos del planeta y el exceso de agua en otros. Por ejemplo durante el Fenómeno del Niño de 1998 que significó la inundación de algunas zonas, también ocurrieron los eventos de sequía.

En Brasil la sequía causó incendios que arrasaron 50,000 Km² de bosques. En nuestro País lo intenso de estas lluvias se relacionó también a la carencia de precipitaciones en otros puntos del territorio tal y como ocurrió en la década del 80 a la par el fenómeno del niño en la costa norte, una fuerte sequía ocurría en la sierra sur y central con una pérdida estimada de 200 a 200 millones de dólares.

Entre 2003 y 2013 se reportaron a nivel nacional 163 eventos de sequías, siendo mayor en la vertiente del Pacífico (127 eventos), seguidos por la vertiente del Titicaca (25 eventos) y la vertiente del Atlántico (11 eventos). Dichas sequías han ocurrido con distinta frecuencia, siendo mayor el número de la frecuencia anual y las que ocurren entre 3 y 9 años con 85 eventos y 70 eventos. La mayor cantidad de eventos reportados corresponden a los ocurridos entre el año 2000 al 2008 y el año 2010 con 73 y 62 casos.

1.3 Justificación

De acuerdo al Plan de Gestión de Riesgo y adaptación al Cambio Climático en el sector agrario 2012 -2021 PLANGRACC, se ha identificado las zonas de alto riesgo a las sequias, siendo ellas: Riesgo a Sequías donde se puede mencionar que: 12 regiones que tienen riesgo medio (RM) entre las cuales se encuentra el departamento de Puno.

El SENAMHI tiene como parte de sus objetivos lograr la evaluación cuantitativa y cualitativa de los eventos extremos y determinar su potencial económicamente utilizable para diferentes usos sectoriales, además de orientar y fomentar la investigación científica y tecnológica en las diferentes áreas de la meteorología, hidrología, agrometeorología y otras, para su aplicación en el desarrollo nacional.

La Dirección General de Hidrología y Recursos Hídricos (DGH) es el órgano de línea encargado de realizar estudios, investigaciones, proyectos y servicios en el área de la hidrología y recursos hídricos y sus aplicaciones en el país. Teniendo como una de sus funciones la de ejecutar la vigilancia y evaluación del recurso hídrico superficial, y eventos extremos como sequías e inundaciones a fin de contribuir a la preservación y conservación del medio ambiente y al desarrollo de las actividades humanas.

El SENAMHI, a través de la DGH viene realizando el monitoreo de la sequías a nivel nacional, mediante la publicación de boletines mensuales desde setiembre del 2014 a la actualidad.

En el Perú, diversas entidades han realizado estudios hidrológicos orientados a la vigilancia de eventos hidrometeorológicos extremos en diferentes regiones del país, complementariamente, el SENAMHI realiza el monitoreo permanente de las condiciones hidrológicas en el departamento de Puno y el respectivo pronóstico hidrometeorológicos para las siguientes 72 horas; sin embargo, hasta el momento no se encontró un estudio relacionado al uso de técnicas de sensoramiento remoto para el monitoreo de sequías en la bibliografía ningún estudio orientado al análisis de las posibles alteraciones hidrológicas causada por la regulación de las cuencas en nuestro país.

1.4 Objetivos

1.4.1 Objetivo General

Evaluar la representatividad de índices de sequía calculados a partir de datos de sensoramiento remoto usando el índice estandarizado de precipitación en el departamento de Puno.

1.4.2 Objetivos específicos

- ✓ Evaluar la capacidad de los índices de sequía de sensoramiento remoto en el monitoreo de la sequía usando el índice de sequía in-situ SPI, comparando los indicadores de sequía de sensoramiento remoto con diferentes escalas del SPI en el espacio y tiempo.
- ✓ Desarrollar un índice de sequía integrando múltiples productos de sensoramiento remoto para la vigilancia de la sequía sobre la región de Puno.
- ✓ Investigar las características del índice de sequía integrado de múltiples sensores detectados en los mapas de sequía.

II. Zona de Estudio

2.1 Ubicación

2.1.1 Ubicación geográfica

La región Puno se localiza en la sierra sudeste del país, en la meseta del Collao a: 13°66'00" y 17°17'30" de latitud sur y los 71°06'57" y 68°48'46" de longitud oeste del meridiano de Greenwich.

2.1.2 Ubicación política

Puno se encuentra limitada por el Sur, con la región Tacna. Por el Este, con la República de Bolivia y por el Oeste, con las regiones de Cusco, Arequipa y Moquegua. La región Puno se encuentra en el Altiplano entre los 3,812 y 5,500 msnm y entre la ceja de Selva y la Selva alta entre los 4,200 y 500 msnm, ver Figura 1.

2.2 Climatología

En general el clima de Puno es frío, moderadamente lluvioso y con amplitud térmica moderada. La media anual de temperatura máxima y mínima (1981-2014) es de 15 °C y 5°C, respectivamente (Figura 2 y 3).

La precipitación media acumulada anual para el periodo 1981-2014 es de 700mm (Figura 4).

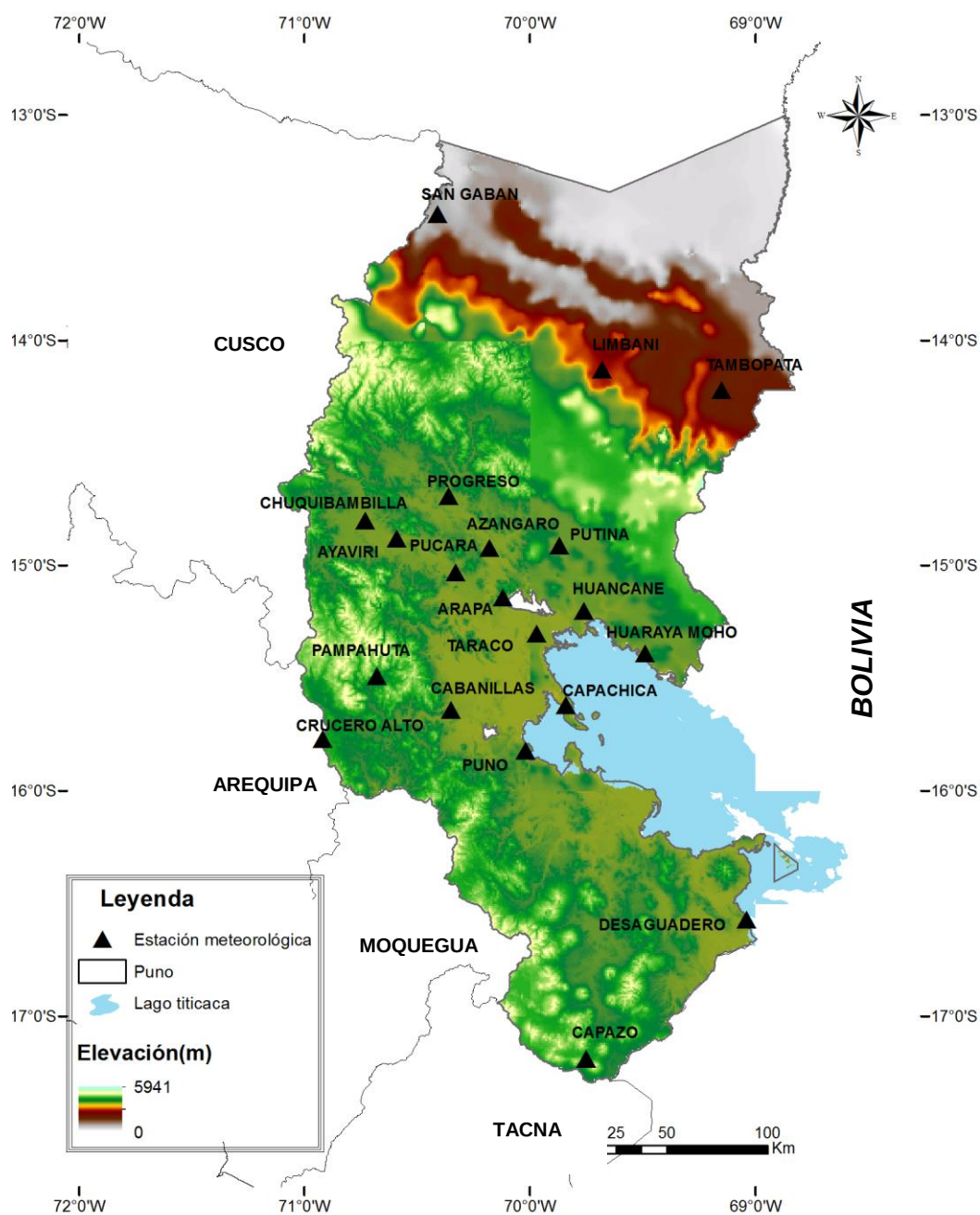


Figura 1: Mapa de zona de estudio Región Puno y ubicación de estaciones meteorológicas.

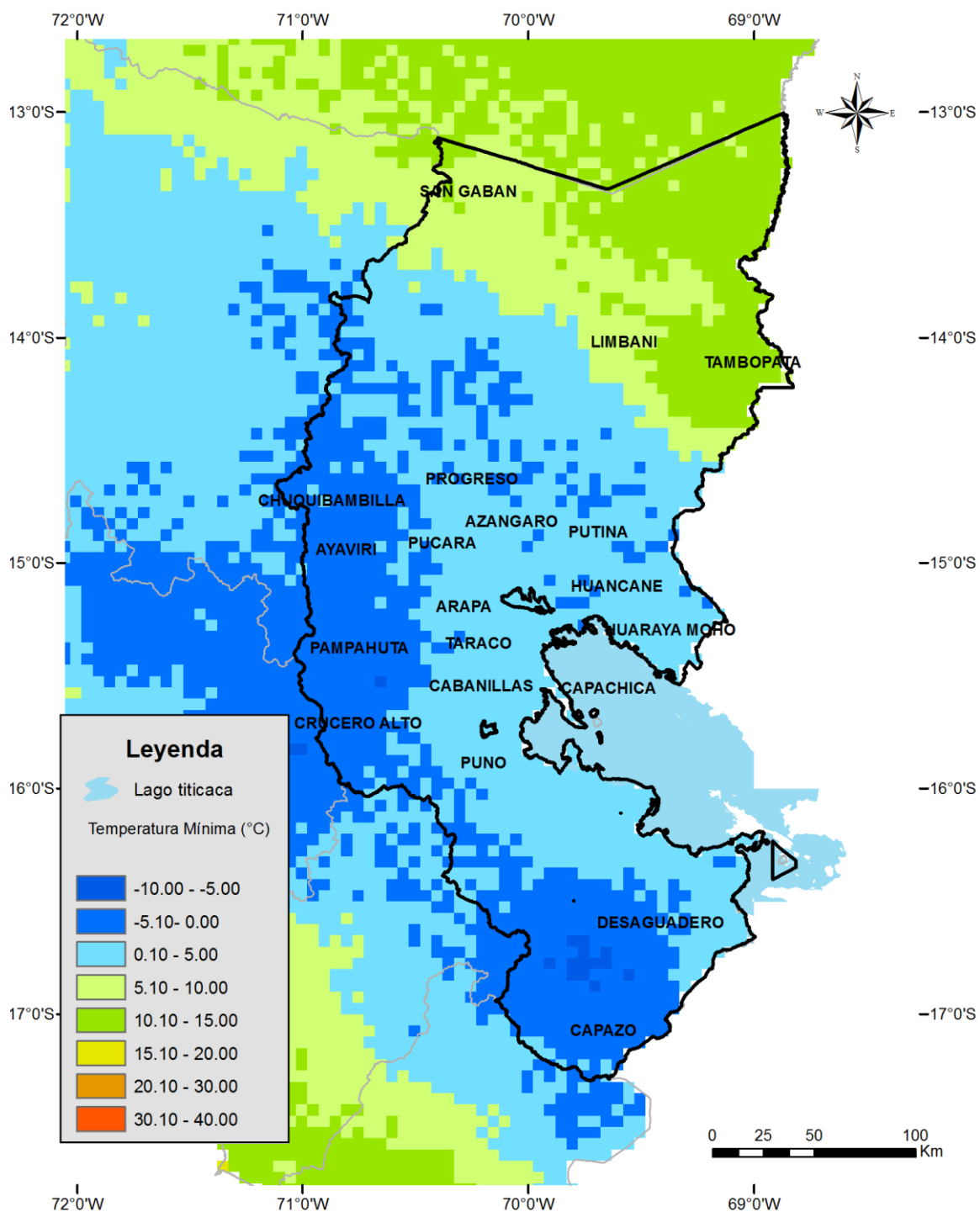


Figura 2: Promedio de Temperatura mínima del aire multianual del departamento de Puno.

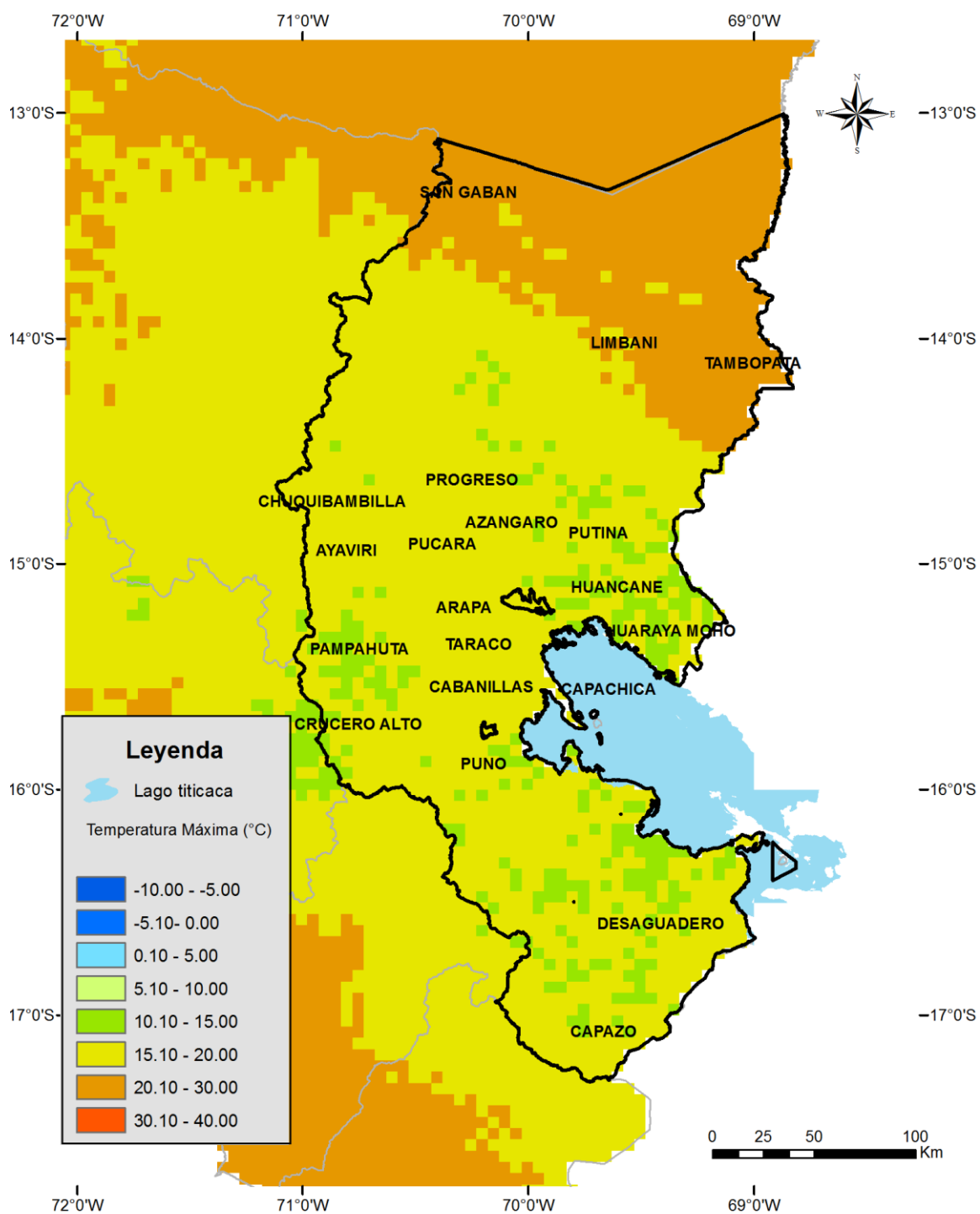


Figura 3: Promedio de Temperatura máxima del aire multianual del departamento de Puno.

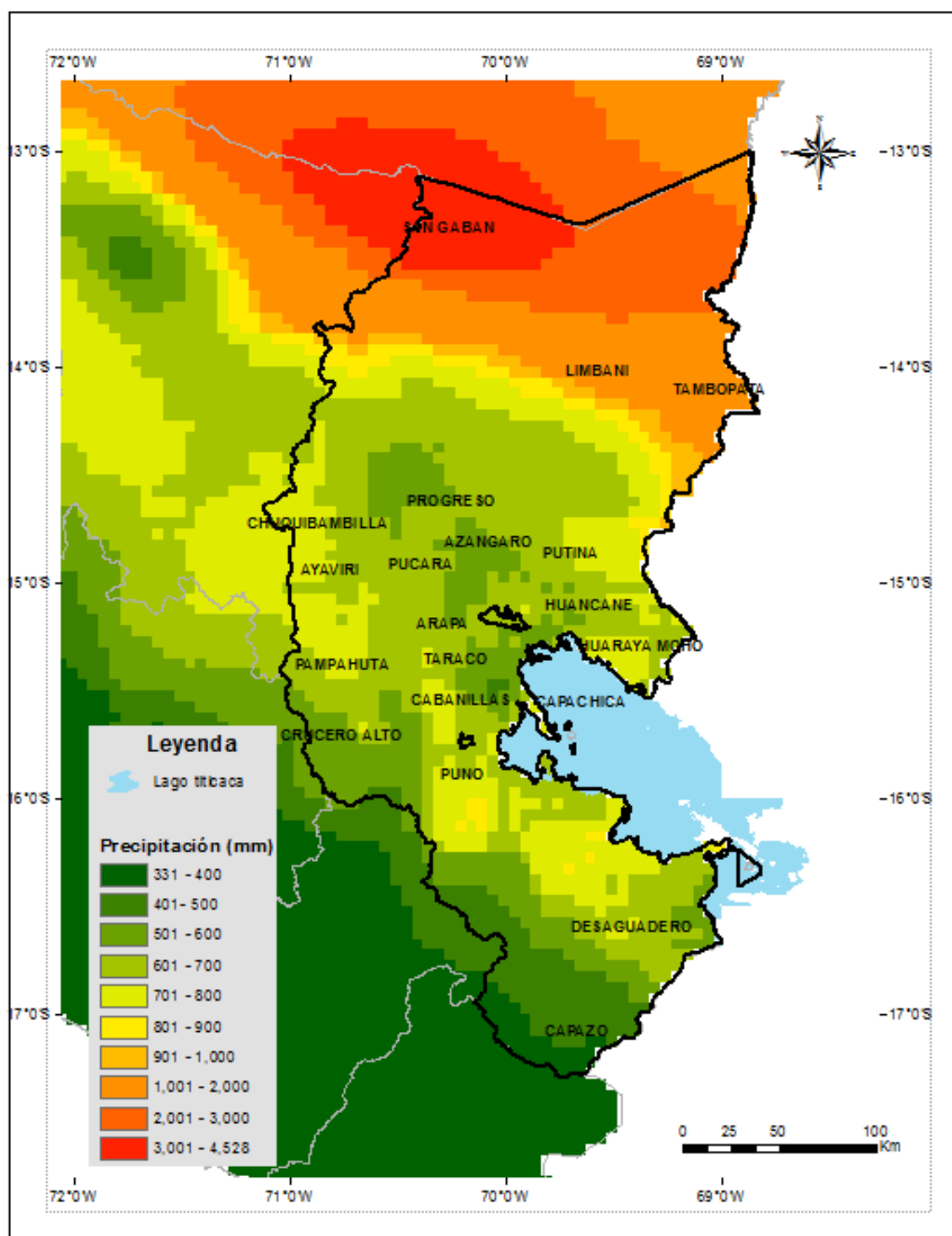


Figura 4: Promedio de Precipitación multianual del departamento de Puno.

III. DATOS Y METODOLOGÍA

A continuación se detalla la metodología utilizada en este trabajo, en el Anexo 2 se muestra un esquema general.

3.1 Datos de Precipitación observada e índices de sequía

Datos de precipitación mensual de todas las estaciones disponibles desde 1970 al 2013 obtenidas del Servicio nacional de meteorología e Hidrología del Perú (SENAMHI) sobre el área de estudio. De las cuales, se seleccionaron 209 estaciones meteorológicas (Figura 5) de las cuales 16 estaciones pertenecen a la región del Altiplano (Puno).

La presente tabla resume el número de estaciones por región de análisis:

Tabla 1. Regiones de análisis y número de estaciones a usar.

ID	Región	Nro. Estaciones
1	Costa norte (CN)	7
2	Selva norte (SN)	18
3	Sierra norte occidental (SNOC)	20
4	Sierra norte oriental (SNOR)	41
5	Sierra central occidental (SCOC)	41
6	Sierra central oriental (SCOR)	8
7	Sierra sur occidental (SSOC)	51
8	Sierra sur oriental (SSOR)	7
9	Altiplano (A)	16
209 estaciones meteorológicas en total		

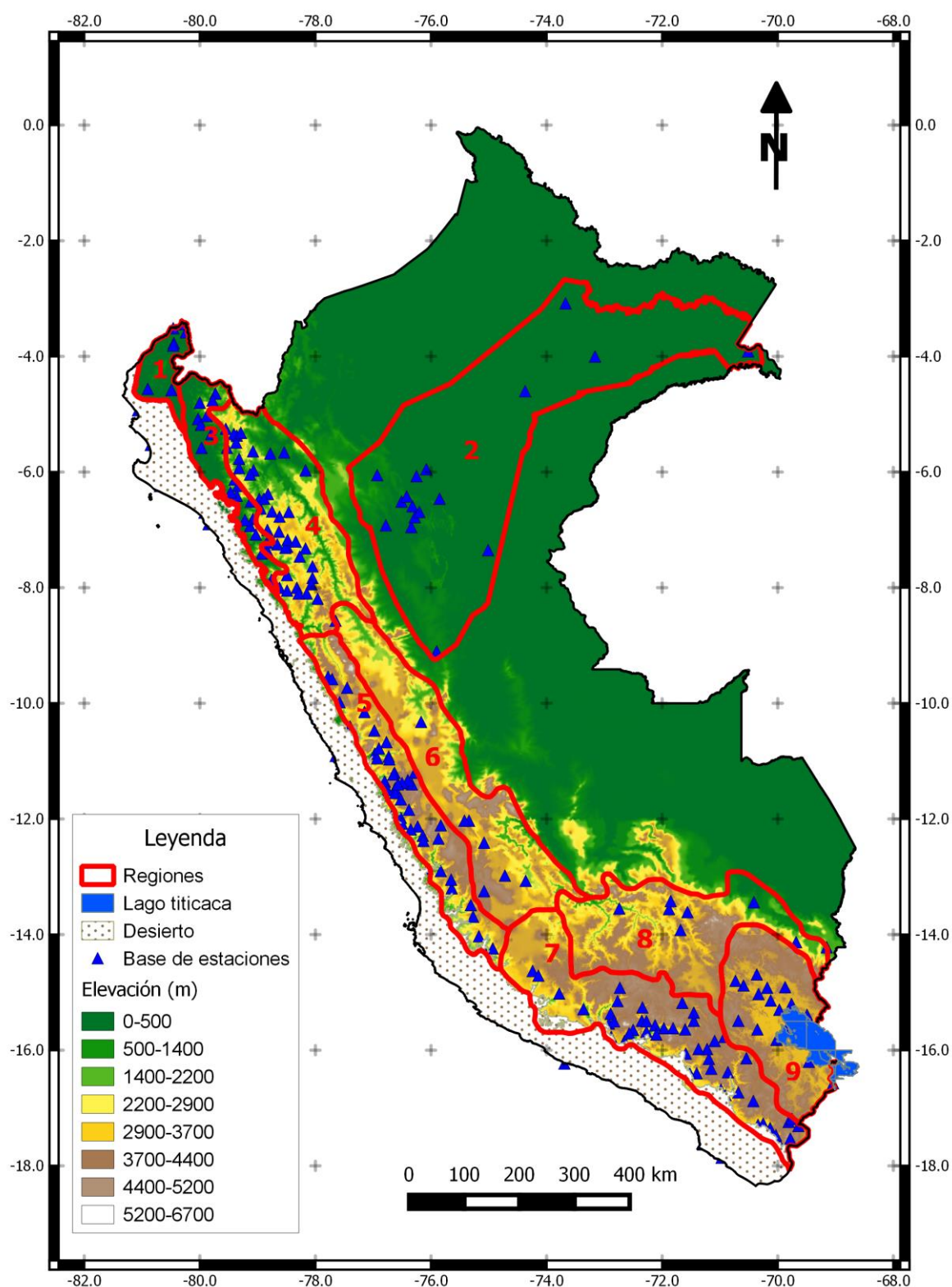


Figura 5: Estaciones meteorológicas

3.1.1 Índice estandarizado de precipitación (SPI)

El SPI, desarrollado por McKee (1996), fue diseñado para cuantificar el déficit de precipitación en diferentes escalas de tiempo. Para estimar el índice SPI se requiere un registro largo de precipitación, el cual está recomendado menos de 50 años para el monitoreo de la sequía de periodo de 1 año o menos (Guttman, 1999). En consecuencia, datos de precipitación desde 1970 al 2013 fueron usados para construir series de SPI 1, 3, 6, 9 y 12 meses para cada estación meteorológica.

3.2 Datos de sensoramiento remoto e índices de sequía

3.2.1 Datos MODIS

Se utilizó los productos MOD13A3 y MOD11A2 del Espectroradiómetro de imágenes de media resolución (MODIS), los cuales, proporcionaron los datos de LST y NDVI de 1 km x 1km de resolución, su resolución temporal es de 8 días para el MOD11A2 y un mes para el MOD13A3. El periodo es de 2001 al 2013.

3.2.2 Precipitación TRMM

El satélite TRMM fue lanzado en noviembre de 1997, y desde entonces, muchos algoritmos vienen siendo desarrollados para estimar la precipitación (Iguchi, 2000). En este trabajo, fue usado el producto precipitación mensual grillada del análisis de precipitación de multi-satélites TRMM (TMPA). Para el monitoreo de variación de la precipitación y la sequía (Huffman, 2007). El conjunto de datos 3B43 fue estimado desde múltiples satélites, cuando el análisis de calibración sea posible. La cobertura espacial se extiende desde 50° de latitud de sur a 50° de latitud norte con una resolución espacial de 0.25° x 0.25° desde 1998 al presente, su resolución temporal de cada 3 horas (mm/h). El conjunto de datos seleccionados para este trabajo son del periodo 2001 al 2013, los cuales fueron obtenidos desde La administración nacional de la aeronáutica y del espacio (NASA) del centro del servicio de datos e información (DISC).

La tabla 2 describe un resumen de los datos utilizados para el presente estudio.

Tabla 2. Datos de satélite utilizados y su descripción

Producto	TRMM 3B42-RT	MOD11A2	MOD13A3
Nombre	Datos de precipitación	Temperatura superficial del suelo (LST)	Índice de vegetación de diferencia normalizada (NDVI)
Escala espacial	~ 25 Km x 25 Km	1 Km x 1 Km	1 Km x 1 Km
Escala temporal	3 horas	8 días	1 mes
Unidades	milímetros	Kelvin	-

3.2.3 Índice de sequía de sensoramiento remoto

- **Índice de Condición de Vegetación (VCI)**

Los cambios de NDVI relacionados a las condiciones meteorológicas son más pequeños que aquellos relacionados al ecosistema y los impactos de la sequía sobre la vegetación no son fácilmente detectados a partir de los datos de NDVI directamente (L. du et al., 2013). De este modo (Kogan, 1995b) desarrollo el índice de condición de vegetación (VCI), por sus siglas en ingles) para controlar las diferencias locales en la productividad de un ecosistema. El VCI es una normalización del NDVI basada en píxeles, en la cual, la señal climática de corto periodo del NDVI es filtrada separándola de la señal ecológica de largo periodo. La vegetación es afectada por la variación climática. En una cierta estación y región climática, una sequía extrema debilita el crecimiento de la vegetación Ya que se puede encontrar bajos índices de observaciones multianuales de NDVI. Así mismo, una observación más alta de NDVI representa una condición climática óptima.

Sin embargo, el VCI es un mejor indicador que el NDVI del impacto de la sequía sobre la vegetación. El VCI es definido por la siguiente ecuación.

$$VCI = \frac{NDVI - NDVI_{min}}{NDVI_{max} - NDVI_{min}}$$

Donde NDVI, es el NDVI promediado mensualmente y los valores de $NDVI_{min}$ y $NDVI_{max}$ son calculados a partir de toda la serie para cada pixel de todos los registros (2000 a 2013). El VCI cambia entre 0 y 1 correspondiendo a los cambios en la condición de vegetación de extremadamente no favorable a óptima.

- **Índice de Condición de Temperatura (TCI)**

Durante la sequía, la superficie de suelo se encontrará con un esfuerzo térmico. Por lo tanto, el índice de condición de temperatura (TCI), el indicador de esfuerzo térmico es propuesto para determinar la relación de la temperatura y el fenómeno de sequía (Kogan, 1995a). Este índice asume que el evento de sequía decrece con la mezcla de suelo y causa el esfuerzo térmico en la superficie de suelo. El algoritmo de TCI fue similar al de VCI y sus condiciones de mínima/máxima temperatura fueron estimadas relativamente en una serie de tiempo dada.

Sin embargo, opuesto al NDVI, un alto valor de LST en la vegetación se incrementa el índice desfavorablemente o condición de sequía. Mientras, que un bajo valor de LST indica condiciones favorables (Singh et al., 2013) Por esta razón la fórmula del TCI fue modificada por la siguiente expresión:

$$TCI = \frac{LST_{max} - LST}{LST_{max} - LST_{min}}$$

Donde LST, es el LST promediado mensualmente y los valores de LST_{min} y LST_{max} son calculados a partir de toda la serie para cada pixel respectivamente, para el periodo de estudio (2000 a 2013). Como el VCI, en un proceso de sequía, el TCI se acerca o es igual a 0, y la condición de humedad de VCI se acerca a 1.

▪ **Índice de Condición de Precipitación (PCI)**

La estimación de precipitación tiene una componente climática espacial y temporal, pero no puede ser analizada con el VCI y TCI. Por lo tanto, en este trabajo el índice de condición de precipitación (PCI). Datos del producto TRMM 3B43, la cual es normalizada usando un similar algoritmo del VCI es definida para el déficit de precipitación para las señales climáticas. El PCI tiene la siguiente expresión.

$$PCI = \frac{TRMM - TRMM_{min}}{TRMM_{max} - TRMM_{min}}$$

Donde TRMM, $TRMM_{min}$ y $TRMM_{max}$ son los valores de precipitación promedio mensual, mínimo y máximo de cada pixel de su mismo mes respectivo durante el periodo 2000 – 2013. El PCI también varía entre 0 y 1, correspondiendo a los cambios de precipitación desde extremadamente desfavorable a óptima. En el caso de la sequía meteorológica la cual tiene una extremada precipitación baja, el PCI se acerca o es igual a 0, y en condiciones de inundación el PCI se acerca a 1.

3.3 Análisis de SPI e índices de sequía de sensoramiento remoto

3.3.1 Análisis de correlación

El análisis de correlación de *Pearson* fue realizado entre los índices de sequía de sensoramiento remoto y valores del SPI a escala 1, 3, 6, 9 y 12 meses (SPIs) sobre cada región de análisis para el periodo de análisis del 2001 al 2013 para evaluar la capacidad de los índices de sensoramiento remoto en el monitoreo de sequías sobre el tiempo y el espacio. Ya que la relación entre los índices de sequía de sensoramiento remoto y el SPI varía en el tiempo (Ji and Peters, 2003), nosotros analizaremos la correlación desde todo el periodo anual, periodo húmedo (abril a diciembre) y por cada mes del periodo húmedo de diciembre a abril. El coeficiente de correlación y el p-valor fueron obtenidos para cada análisis.

Los distintos índices de sensoramiento remoto tiene una esquema de clasificación de sequía (Anexo 1) propuesto por (Zhang, 2013).

3.3.2 Comparación espacial entre mapas de sensoramiento remoto

Una serie de mapas fueron creados para comparar patrones espaciales de sequía sobre la región. Mapas de precipitación, NDVI, LST fueron creados para caracterizar la distribución espacial de las variables de sensoramiento remoto para febrero del 2010. Periodo en el cual es conocido como un periodo seco de precipitación. Mientras tanto, se realizó un análisis espacial de mapas de sequía de sensoramiento remoto PCI, TCI y VCI si ellos tenían una consistencia espacial.

3.3.3 Índice de sequía integrado MIDI

Para estimar el índice de sequía integrado se realizó la técnica estadística de Regresión lineal múltiple, con el objetivo de obtener diferentes pesos, los cuales proporcionan la capacidad de los diferentes índices de sequía de sensoramiento remoto en el monitoreo de la misma.

3.3.4 Mapas de sequía MIDI y comparado con los índices de sequía in-situ

Mapas de sequía MIDI junto con el SPI a escala de 1 mes para el periodo de enero 2001 a diciembre 2010. Adicionalmente, se comparó los índices de sequía in-situ con los índices de sequía MIDI estación por estación para la región del altiplano (Puno).

IV. RESULTADOS Y DISCUSIÓN

4.1 Correlaciones entre índices de sequía de sensoramiento remoto y el índice SPI

Los coeficientes de correlación fueron calculados entre los índices de sequía de sensoramiento remoto y el SPI sobre nueve regiones consideradas a nivel nacional (tabla 3). En general, las correlaciones varían entre regiones y diferentes escalas de tiempo del SPI, y fueron estadísticamente significativas en un nivel de 0.01.

El VCI y TCI muestran altos valores de correlación con el SPI a escalas 6,9 y 12 meses (r alrededor de 0.7) cuando comparamos con índices de sequía de sensoramiento remoto con diferentes escalas del SPI; principalmente el coeficiente de correlación decrece en comparación con el PCI en la mayoría de las regiones analizadas a excepción de la Región 2, 3 y 4 tabla (3.3.1). Esto sugiere que el VCI y TCI, provee más información confiable que otros índices de sensoramiento remoto en el monitoreo de las sequías para estas regiones analizadas.

Para el presente estudio nos enfocaremos de la Región 9, perteneciente al a región de Puno, Los coeficiente de correlación entre PCI y el SPI evaluados para 6,9 y 12 meses obtuvo 0.53 aproximadamente de correlación, Mientras con el VCI se incrementó a 0.6 valor de r para 3 y 6 meses del SPI. El TCI en comparación con el SPI a escala de 1 y

3 meses sugiere información más confiable en el monitoreo de las sequías para la región de Puno con un coeficiente de correlación de 0.7 en promedio.

Tabla 3. Correlación entre índice de sequía de sensoramiento remoto y SPI a diferentes escalas de tiempo. Periodo 2001-2013. Los valores altos de correlación de cada fila y columna son mostradas en rojo *p-value*<0.01.

REGION 1	SPI-1	SPI-3	SPI-6	SPI-9	SPI-12
PCI	0.32	0.23	0.26	0.19	0.15
VCI	0.22	0.43	0.70	0.84	0.83
TCI	0.36	0.50	0.75	0.83	0.75
REGION 2					
PCI	0.62	0.46	0.30	0.20	0.12
VCI	-0.11	-0.03	0.00	-0.04	-0.09
TCI	0.48	0.27	0.11	-0.02	0.01
REGION 3					
PCI	0.52	0.35	0.24	0.18	0.13
VCI	0.27	0.57	0.74	0.82	0.83
TCI	0.56	0.67	0.79	0.81	0.77
REGION 4					
PCI	0.57	0.38	0.24	0.21	0.16
VCI	0.15	0.32	0.29	0.18	0.08
TCI	0.66	0.56	0.51	0.42	0.38
REGION 5					
PCI	0.37	0.31	0.32	0.29	0.19
VCI	0.26	0.58	0.66	0.64	0.62
TCI	0.69	0.67	0.61	0.54	0.39
REGION 6					
PCI	0.49	0.33	0.20	0.12	0.12
VCI	0.15	0.47	0.54	0.49	0.49
TCI	0.64	0.57	0.42	0.30	0.25
REGION 7					
PCI	0.26	0.33	0.34	0.32	0.27
VCI	0.26	0.56	0.69	0.74	0.74
TCI	0.55	0.59	0.52	0.50	0.37
REGION 8					
PCI	0.47	0.56	0.44	0.32	0.26
VCI	0.16	0.47	0.60	0.53	0.41
TCI	0.60	0.60	0.52	0.38	0.28
REGION 9					
PCI	0.43	0.43	0.51	0.54	0.54
VCI	0.30	0.61	0.59	0.48	0.38
TCI	0.71	0.69	0.59	0.49	0.40

4.2 Correlación temporal entre índices de sequía de sensoramiento remoto y el SPI

Los coeficientes de correlación entre los índices de sequía de sensoramiento remoto e in-situ SPIs para cada mes durante la temporada húmeda fueron resumidos (Figura 6). De ello, se puede observar que los coeficientes de correlación varían grandemente en mes a mes a diferentes escalas del SPI como por región. Indicando que la capacidad de los índices en el monitoreo de sequía difiere grandemente a lo largo de los meses húmedos del año.

En la costa norte para el mes de diciembre el PCI fue favorable para el monitoreo de sequías en dicha región a escala de 1 mes del SPI. Sin embargo, para los meses de enero, febrero, marzo y abril del periodo húmedo el VCI y TCI fueron más favorables para el monitoreo de la sequía a escala de 3,6 y 9 meses del SPI (Figura 6. a).

En la selva norte el PCI fue favorable para el monitoreo de la sequías en los meses húmedos a escala de 1 mes del SPI para diciembre y enero, y a escala de 3 meses de SPI para febrero, marzo y abril (Figura 6. a).

En la región de sierra norte occidental, para el mes de diciembre el PCI fue favorable para el monitoreo de sequías a escala de 1 mes. Así mismo, el VCI es favorable a las escala de 9 y 12 meses del SPI. Además, para los meses de enero, febrero, marzo y abril el VCI y TCI fue favorable para el monitoreo de sequía a diferentes escalas del SPI (Figura 6. a).

En la sierra norte oriental para el mes de diciembre y enero el PCI fue favorable para el monitoreo de sequías a escala de 1 mes del SPI. De forma contraria, para los meses de febrero y marzo el TCI fue más favorable en el monitoreo de sequías. Mientras, para el mes de abril el VCI fue más favorable a escala de 1 mes del SPI (Figura 6. b).

Para las regiones de la sierra central SCOC y SCOR el TCI fue más favorable para los meses húmedos del año (Figura 6 b).

En la sierra sur occidental (SSOC), el VCI y TCI fue más favorable para el monitoreo de las sequías, con altas correlaciones de 3, 6, 9 y 12 meses del SPI, proporcionando la posibilidad de integrar estos índices (Figura 6. c).

En la sierra sur oriental (SSOR), el TCI fue más favorable a escala de 1 mes del SPI de enero a abril (Figura 6. b).

En la región del Altiplano (A) del departamento de Puno, para el mes de diciembre el TCI fue más favorable para el monitoreo de sequías para 1 mes de escala del SPI. Mientras, para los meses de enero, febrero y marzo el PCI y TCI fueron favorables a escalas de 9 meses del SPI para el PCI y 1 mes para el TCI, respectivamente (Figura 6. c).

Para resumir, estas correlaciones y la capacidad de cada indicador en el monitoreo de la sequía en las regiones analizadas, se muestra en la figura 6.d. Se optó por realizar la correlación de todo el periodo húmedo (Diciembre - Abril).

El análisis con el SPI-1 (corto plazo), indica que el PCI puede ser utilizado para el monitoreo de la sequía en la región de la selva norte. Mientras, el TCI puede ser usado en las regiones de; costa norte, sierra norte occidental, sierra norte oriental, sierra central occidental, sierra central oriental, sierra sur occidental, sierra sur oriental y el altiplano.

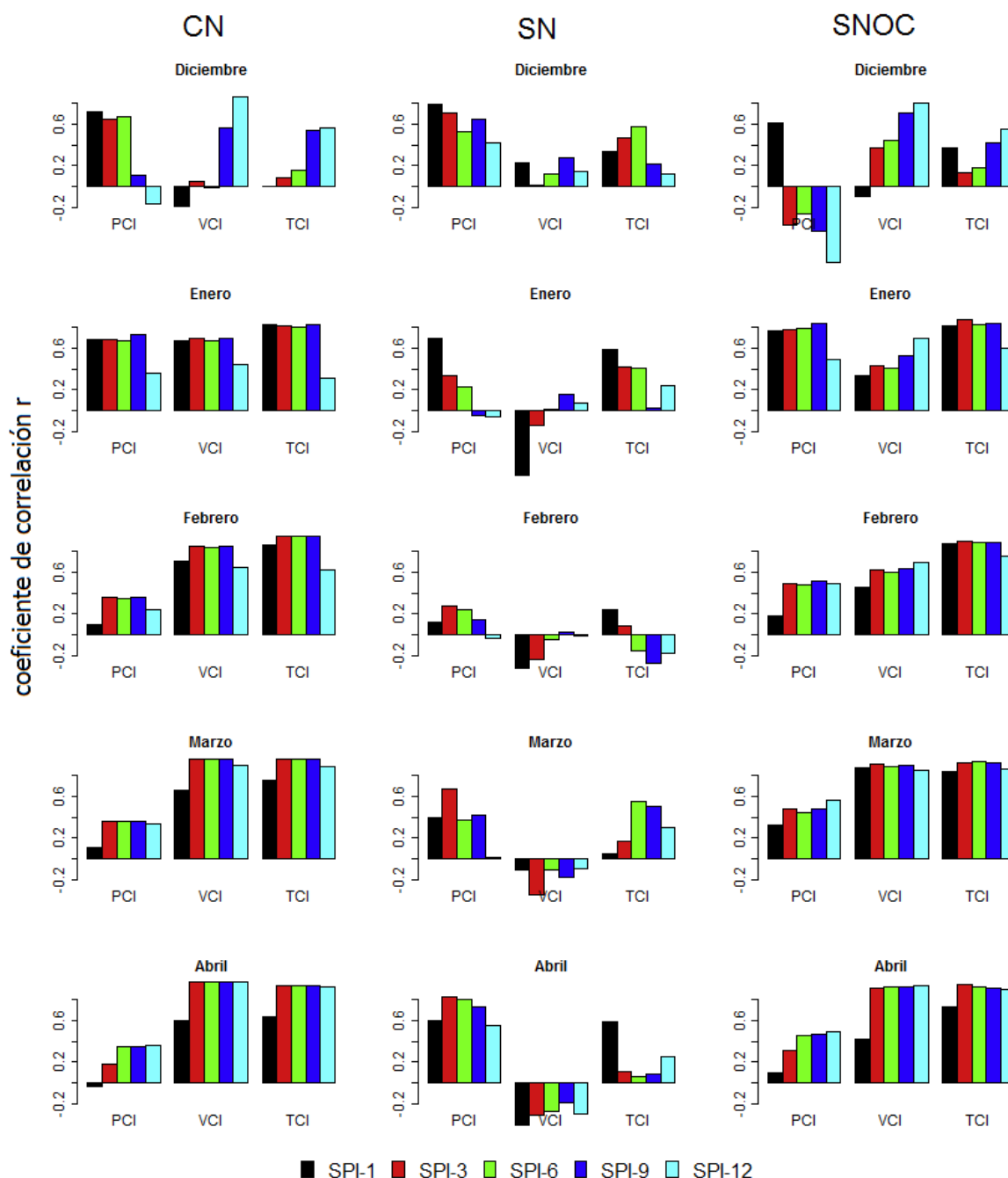


Figura 6: (a) Coeficientes de correlación entre los índices de sequía de sensoramiento

remoto y el SPI a diferentes escalas de tiempo en las 3 regiones, enero (2001-2013).

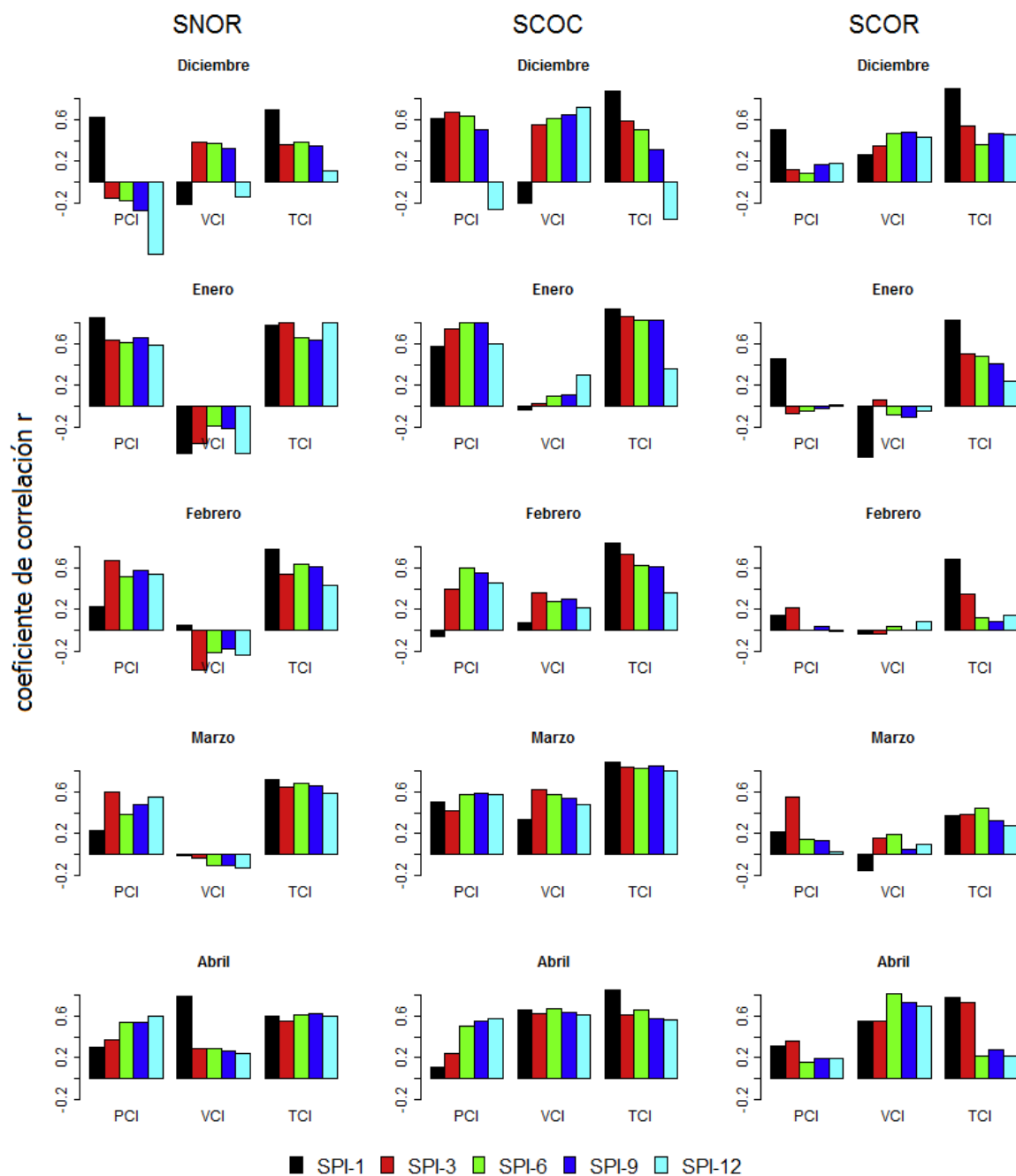


Figura 6: (b) Coeficientes de correlación entre los índices de sequía de sensoramiento remoto y el SPI a diferentes escalas de tiempo en las 3 regiones, enero (2001-2013).

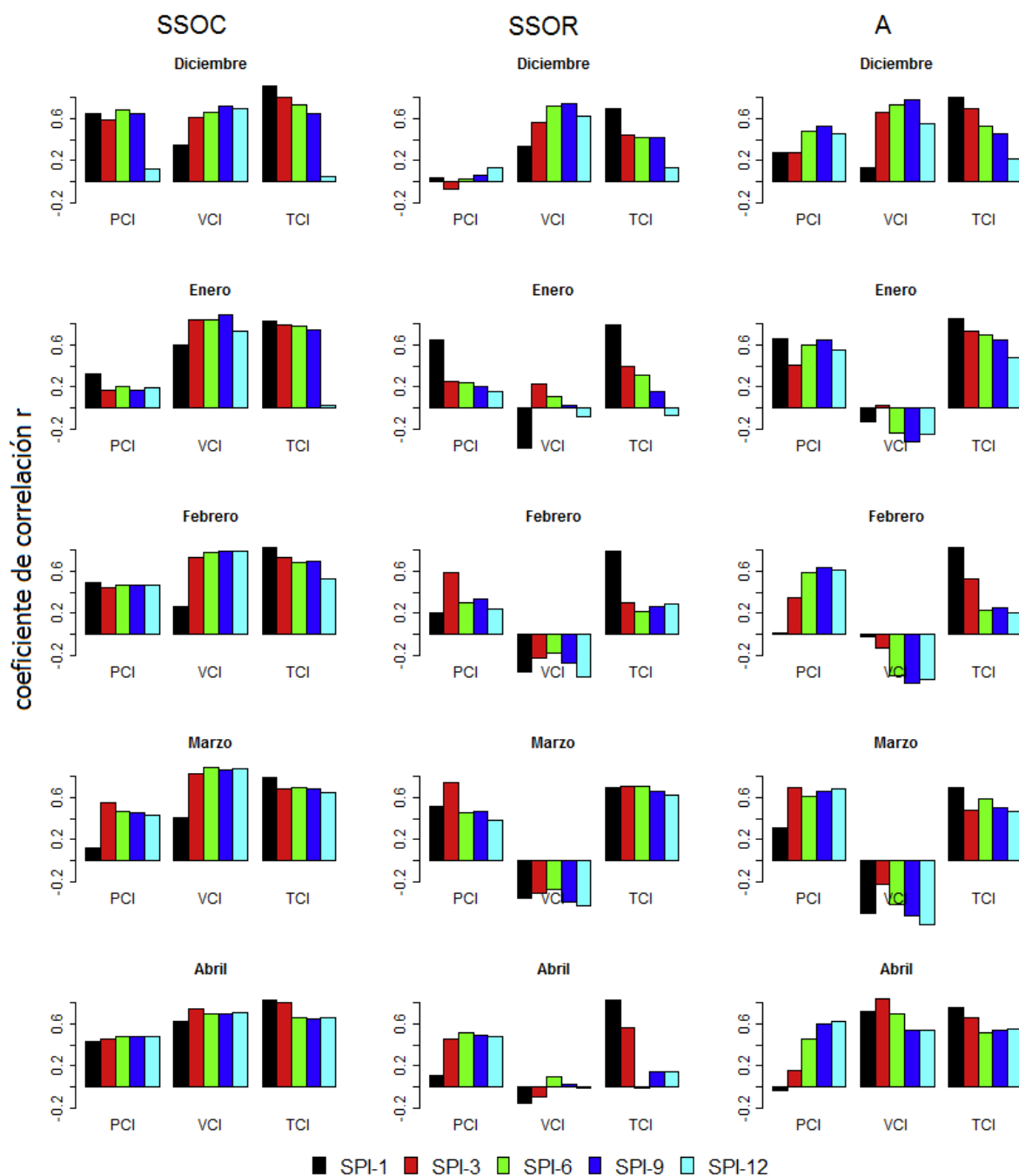


Figura 6: (c) Coeficientes de correlación entre los índices de sequía de sensoramiento remoto y el SPI a diferentes escalas de tiempo en las 3 regiones, enero (2001-2013).

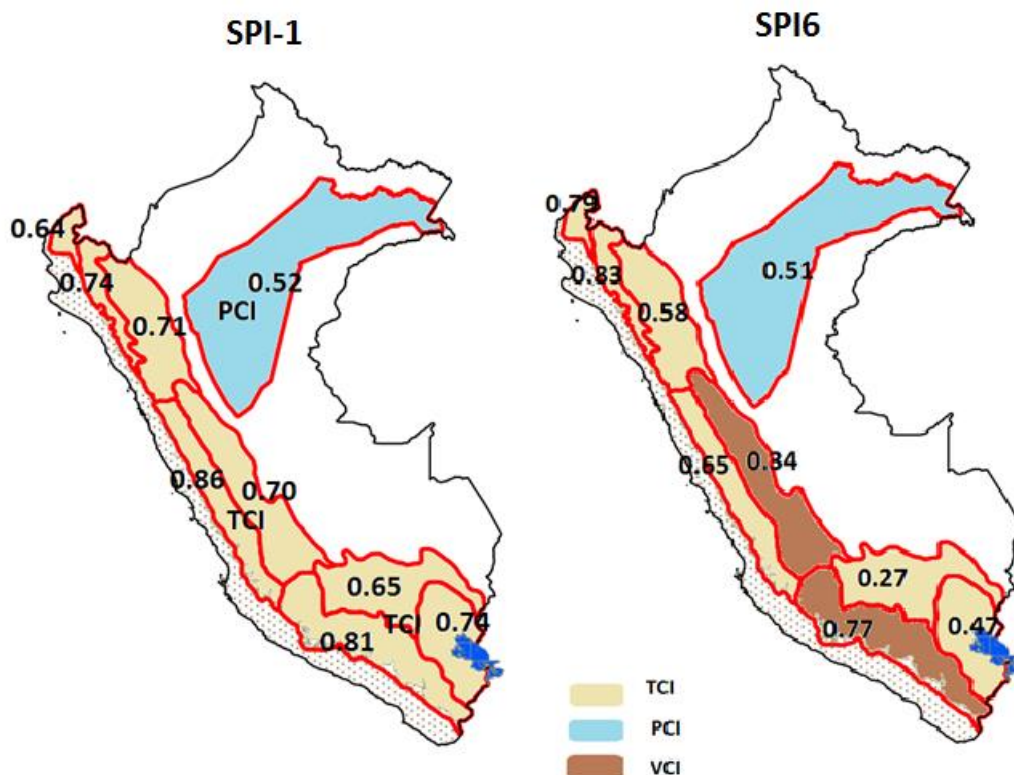


Figura 6: (d) Coeficientes de correlación entre los índices de sequía de sensoramiento remoto y el SPI para el periodo húmedo (diciembre - abril) para SPI - 1 y SPI - 6.

4.3 Comparación espacial de los índices de sequía de sensoramiento remoto

Unas series de mapas fueron creados para comparar lo patrones espaciales de los índices de sequía de sensoramiento remoto (figura 7). Variable derivada de satélite para febrero del 2010 (Figura 7.a), LST (Figura 7.c), y NDVI (Figura 7.f). De la presente figura se observa por sí solo no pueden ser comparados las variables de precipitación, temperatura de suelo y el índice de vegetación, por tal motivo es necesaria la comparación de índices que expliquen la condición de la precipitación, la temperatura del suelo y la vegetación (Anexo 3). Observando las extensiones espaciales del PCI, TCI y VCI se observa que para la región del Altiplano (Puno) el PCI muestra sequía moderada en la zona central, el TCI sequía extrema en algunas zonas y el VCI no muestra sequía. Por tal monito es necesaria la integración de estos indicadores de sequía por satélite.

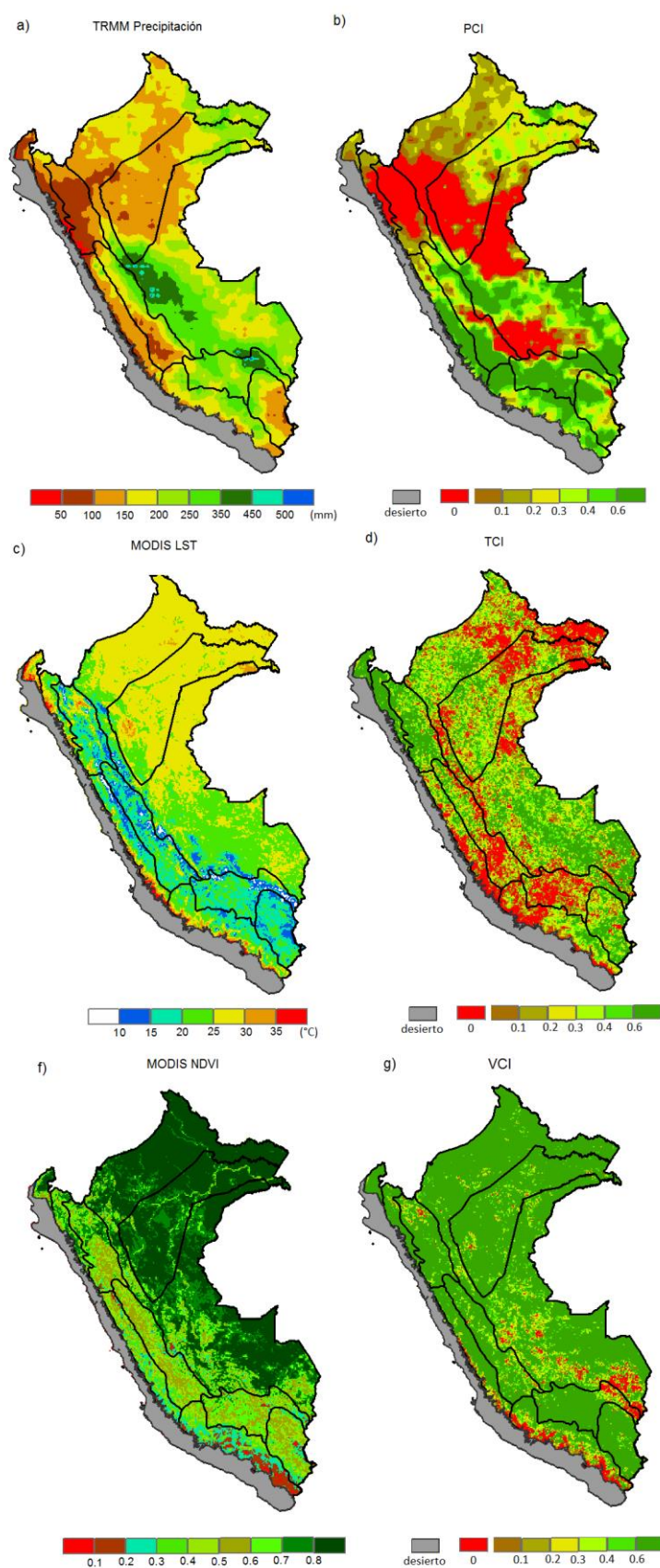


Figura 6: Comparación espacial de índices de sensoramiento remoto.

4.4 Mapas Índice de sequía óptimo MIDI

Del análisis de regresión lineal múltiple y tomando como referencia las altas correlaciones de los índices de sequía de sensoramiento remoto se obtuvo la tabla 4 con sus respectivos pesos y r-cuadrado.

Tabla 4. Pesos para la región del altiplano para PCI, TCI, y VCI.

Altiplano	SPI-1	SPI-3
PCI	0.02	0.16
VCI	0.03	0.41
TCI	0.95	0.43
R r-cuadrado	0.51	0.61

De análisis anterior, se optó por los pesos del SPI-3. Así, obtuvimos 0.16 para el PCI, 0.41 para el VCI y 0.43 para TCI. Se estimó mapas de sequía integrado de sensoramiento remoto (MIDI) para la región del Altiplano perteneciente al departamento de Puno. De esa forma se obtuvo los mapas de la figura 8.

De los siguientes mapas se observa sequía extrema cerca del Lago Titicaca y sequía moderada en el norte y sur de la región de análisis para el mes de diciembre (figura 8.a), Mientras en enero y febrero se observa condiciones normales (Figura 8.b y c). En marzo se observa condiciones de sequía leve en algunas zonas (Figura 8.d), finalmente en el mes de abril se presentó condiciones de sequía de extrema a leve en muchas zonas de la región (Figura 8.e).

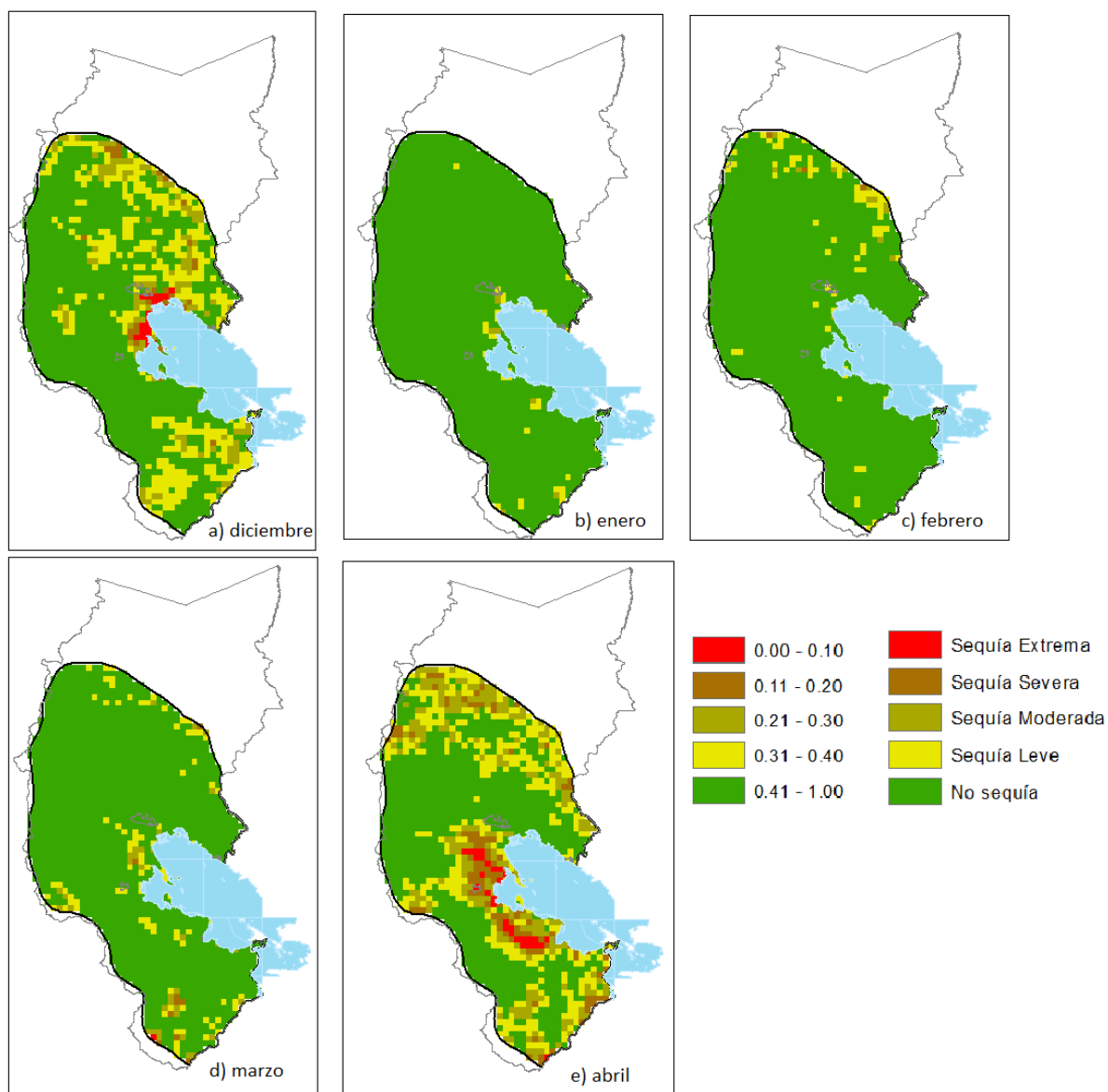


Figura 7: Cambios de condición de sequía para el periodo húmedo 2010 (diciembre 2009 – abril 2010), MIDI.

4.5 Comparación índice de sequía MIDI y con el SPI-3

Esté análisis se realizó para la región del Altiplano (Puno), teniendo 16 estaciones in-situ sobre la región, para el periodo 2001 al 2010. Utilizando la técnica estadística de regresión múltiple se obtuvo la siguiente tabla de resultados (Tabla 5):

Tabla 5. Descripción de los pesos para cada estación respecto al PCI, TCI, y VCI.

<u>CODIGO</u>	<u>ESTACIÓN</u>	PESOS		
		<u>PCI</u>	<u>VCI</u>	<u>TCI</u>
115035	ARAPA	0.15	0.56	0.29
114038	AYAVIRI	0.10	0.57	0.34
114099	AZANGARO	0.05	0.61	0.34
115033	CABANILLAS	0.20	0.34	0.46
100021	CAPACHICA	0.15	0.50	0.35
114035	CHUQUIBAMBILLA	0.22	0.40	0.38
116060	DESAGUADERO	-	-	-
115037	HUANCANE	0.19	0.44	0.37
115038	HUARAYA MOHO	0.36	0.36	0.29
116061	JULI	0.34	0.25	0.41
115027	PAMPAHUTA	0.15	0.42	0.44
114040	PROGRESO	0.17	0.47	0.36
115113	PUCARA	0.16	0.51	0.34
100110	PUNO	0.16	0.38	0.46
114093	PUTINA	0.24	0.48	0.28
115116	TARACO	0.05	0.64	0.32

De la tabla anterior se observa distintos pesos para cada estación, posteriormente se calculó el índice de sequía integrado de sensoramiento remoto. En la figura 9 se muestra la comparación entre el MIDI y el SPI-3 para algunas estaciones meteorológicas para la región del Altiplano (Puno).

La figura 9, para la estación de Arapa el índice MIDI coincide en percibir la sequía con el SPI-3 para el periodo 2006 al 2007 y para el año 2009. En la estación de Azángaro en el 2004, 2007 y el 2008 ambos índices de sequía coincide en la identificación del evento. De igual manera se da esto en las estaciones de Puno y Pampahuta existe coincidencia de eventos de sequía para las diferentes periodos y estaciones analizadas.

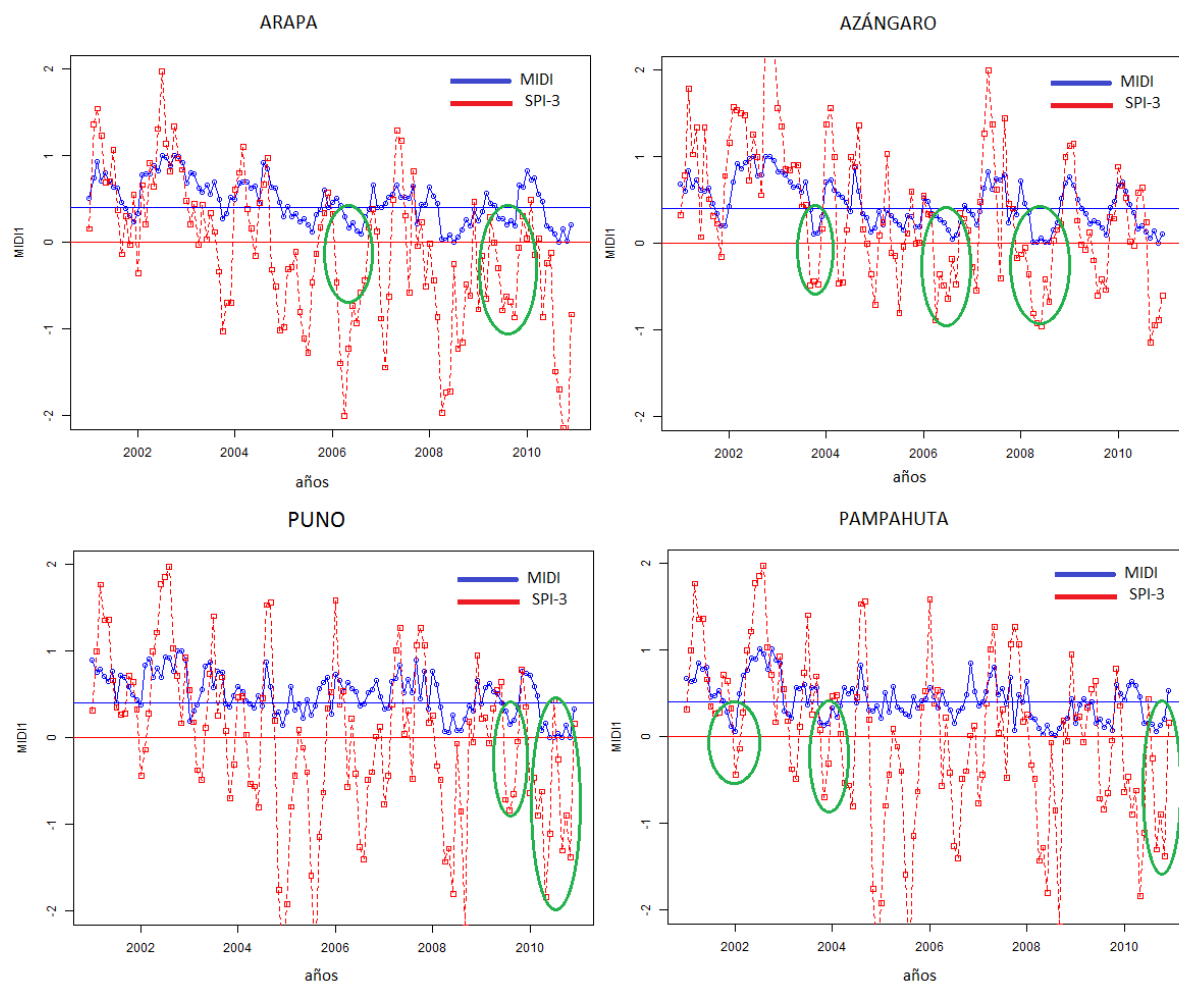


Figura 8: Cambios de condición de sequía para el periodo húmedo 2010 (diciembre 2009 – abril 2010), MIDI.

V. CONCLUSIONES

- Se ha demostrado que los índices de sequía de sensoramiento remoto tiene la capacidad de identificar los eventos de sequía, según el análisis de correlación con el índice de precipitación estandarizado (SPI) en términos de intensidad y por regiones según zonas climáticas.
- A escala de 1 mes en todas las regiones analizadas el TCI tiene valores altos de correlación con el SPI-1, excepto en la Selva norte que tiene relación con el PCI. Sin embargo, a escala de 6 meses en las regiones de la sierra central oriental y sierra sur occidental tiene mayor correlación con el VCI.
- En la región del Altiplano perteneciente al departamento de Puno, TCI tiene más capacidad para detectar sequía a corto plazo SPI-1. Mientras que a escala de 3 meses del SPI, el VCI y TCI contribuyen en el monitoreo de la sequía.

VI. BIBLIOGRAFÍA

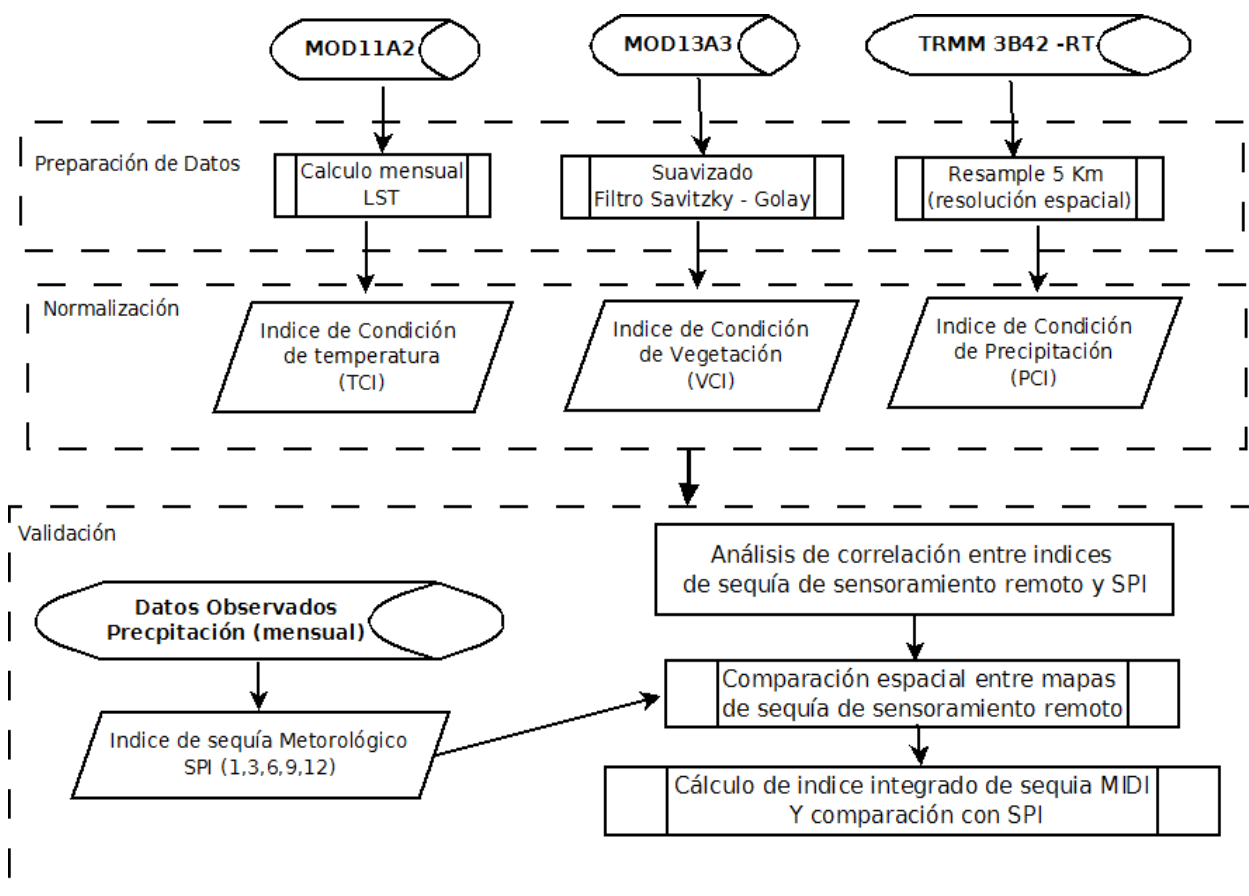
- Du, L., Tian, Q., Huang, Y., Liu, J., 2012. A comprehensive drought monitoring method integrating MODIS and TRMM data. *International Journal of Applied Earth Observation and Geoinformation* 23 (2013), 245–253 (in China).
- Heim, R.R., 2002. A review of twentieth-century drought indices used in the United States. *Bulletin of the American Meteorological Society* 83 (8), 1149–1166.
- Keyantash, J., Dracup, J.A., 2002. The quantification of drought: an evaluation of drought indices. *Bulletin of the American Meteorological Society* 83, 1167–1180.
- Kogan, F.N., 1995a. Application of vegetation index and brightness temperature for drought detection. *Advances in Space Research* 15 (11), 91–100.
- Kogan, F.N., 1995b. Droughts of the late 1980s in the United States as derived from NOAA polar-orbiting satellite data. *Bulletin of the American Meteorological Society* 76 (5), 655–668.
- Kogan, F.N., 1997. Global drought watch from space. *Bulletin of the American Meteorological Society* 78 (4), 621–636.
- Singh, R.P., Roy, S., Kogan, F., 2003. Vegetation and temperature condition indices from NOAA AVHRR data for drought monitoring over India. *International Journal of Remote Sensing* 24 (22), 4393–4402.
- Zhao, M.S., Running, S.W., 2010. Drought-induced reduction in global terrestrial net primary production from 2000 through 2009. *Science* 329 (5994), 940–943.
- Zhang, X., Friedl, M. A., Schaaf, C. B., Strahlar, A. H., and Liu, Z., 2005. Monitoring the response of vegetation phenology to precipitation in Africa by coupling MODIS and TRMM instruments. *J. Geophys. Res.* 110, D12103, doi: 10.1029/2004JD005263.

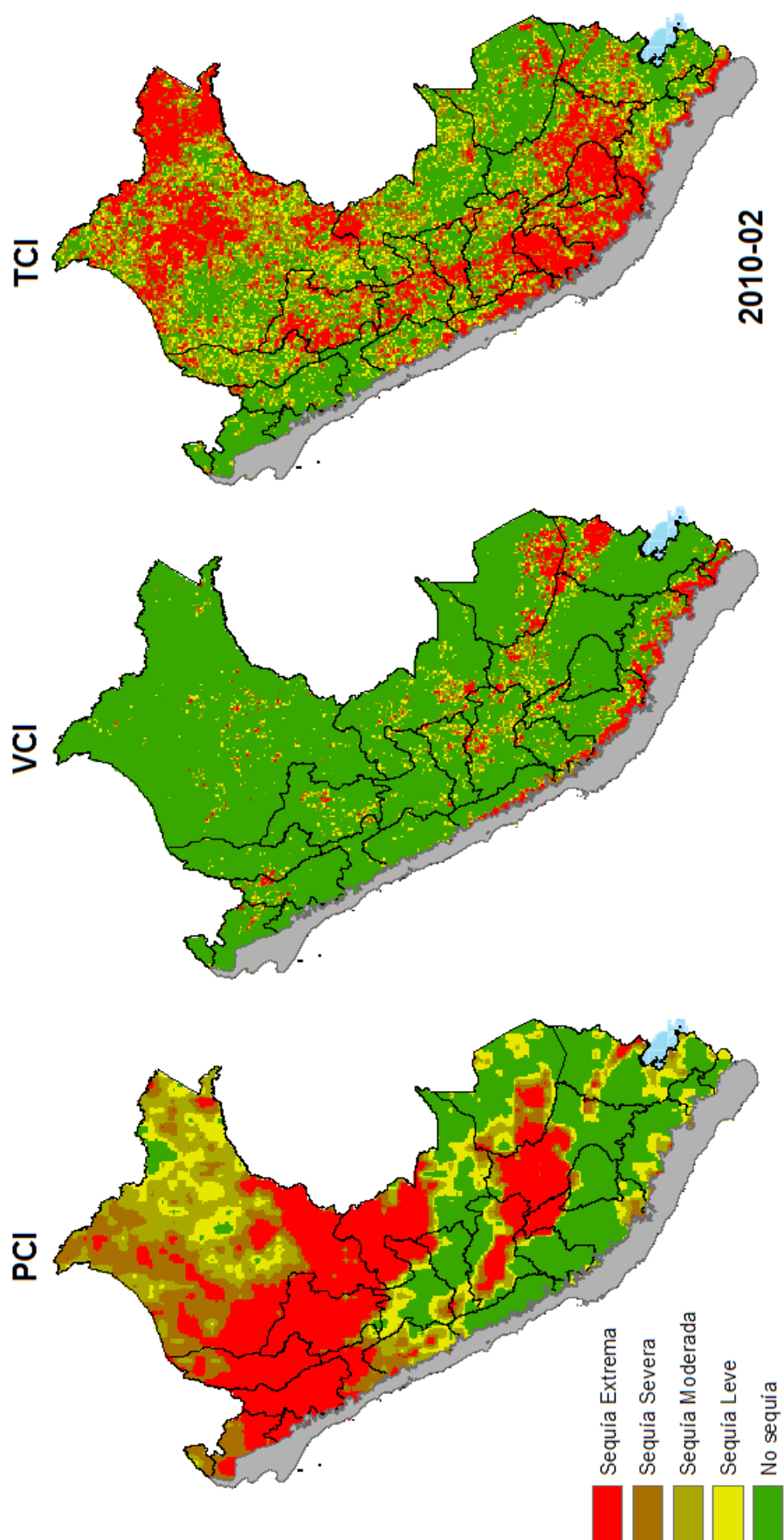
ANEXOS:

Anexo 1: Esquema de clasificación de sequía

Clases Sequía	PCI, TCI, VCI
Sequía Extrema	0.00 - 0.10
Sequía Severa	0.11-0.20
Sequía Moderada	0.21-0.30
Sequía Leve	0.31-0.40
No Sequía	≥ 0.41

Anexo 2: Esquema metodológico del presente estudio





Anexo 3: Mapas de sequía de sensoramiento remoto a nivel nacional