

**UNIVERSIDAD NACIONAL AGRARIA**

**LA MOLINA**

**FACULTAD DE INGENIERÍA AGRÍCOLA**



**“ANÁLISIS DE LA SEQUÍA HIDROLÓGICA EN EL PERÚ”**

**Presentado por:**

**JESÚS DAVID SOSA SARMIENTO**

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

**Lima – Perú**

**2016**

## **DEDICATORIA**

En memoria del Sensei Joaquín Maruy Tashima.

A mi familia por la perseverancia y la larga espera.

A los docentes de la FIA de la UNALM.

A los profesionales del SENAMHI-PERÚ.

A mis amigos.

## AGRADECIMIENTO

A mis padres, Antonio y Martha.  
Al Ing. Óscar Felipe,  
Ing. Juan Arboleda,  
Dr. Waldo Lavado,  
Ing. Cayo Ramos y  
A mi persona favorita, Lissett Córdova  
por el apoyo incondicional.

## ÍNDICE GENERAL

<b>ÍNDICE GENERAL</b> .....	<b>i</b>
<b>ÍNDICE DE FIGURAS</b> .....	<b>IV</b>
<b>ÍNDICE DE TABLAS</b> .....	<b>VIII</b>
<b>ÍNDICE DE ANEXOS</b> .....	<b>IX</b>
<b>RESUMEN</b> .....	<b>X</b>
<b>I. INTRODUCCIÓN</b> .....	<b>1</b>
<b>II. OBJETIVOS DE LA INVESTIGACIÓN</b> .....	<b>3</b>
<b>2.1 OBJETIVO PRINCIPAL</b> .....	<b>3</b>
<b>2.2 OBJETIVOS ESPECÍFICOS</b> .....	<b>3</b>
<b>III. REVISIÓN BIBLIOGRÁFICA</b> .....	<b>4</b>
<b>3.1 CUENCA HIDROGRÁFICA Y EVENTOS EXTREMOS</b> .....	<b>4</b>
<b>3.2 SEQUÍAS</b> .....	<b>6</b>
<b>3.3 TIPOS DE SEQUÍA</b> .....	<b>8</b>
3.3.1 Sequía Meteorológica o Climatológica .....	9
3.3.2 Sequía Edáfica o agrícola .....	9
3.3.3 Sequía Hidrológica .....	9
3.3.4 Sequía Socio Económica .....	10
<b>3.4 CARACTERIZACIÓN DE SEQUÍAS</b> .....	<b>11</b>
3.4.1 Duración de la sequía .....	11
3.4.2 Magnitud de la sequía.....	11
3.4.3 Extensión de la sequía .....	12
<b>3.5 ÍNDICES DE SEQUÍAS</b> .....	<b>13</b>
3.5.1 Índice de sequía hidrológica de Palmer .....	13
3.5.2 Índice de sequía – demanda.....	14
3.5.3 Índice agregado de sequías .....	15
3.5.4 Índice de escorrentía estandarizado .....	15
3.5.5 Índice de sequía de caudales.....	16
<b>3.6 VERTIENTES HIDROGRÁFICAS DEL PERÚ</b> .....	<b>18</b>
3.6.1 Vertiente del Pacífico .....	18
3.6.2 Vertiente del Atlántico.....	18



3.6.3	Vertiente del Titicaca.....	19
<b>3.7</b>	<b>RÉGIMEN FLUVIAL .....</b>	<b>19</b>
3.7.1	Año hidrológico .....	19
3.7.2	Avenida fluvial .....	19
3.7.3	Estiaje .....	19
<b>3.8</b>	<b>ANÁLISIS DE SERIE DE TIEMPO .....</b>	<b>20</b>
3.8.1	Descripción de los tests estadísticos.....	22
3.8.2	Método del Vector Regional.....	22
<b>3.9</b>	<b>ANÁLISIS DE TENDENCIAS.....</b>	<b>24</b>
3.9.1	Prueba de Mann-Kendall para la detección de tendencia.....	24
3.9.2	Prueba de distribución CUSUM.....	25
<b>3.10</b>	<b>PRUEBA DE NORMALIDAD.....</b>	<b>26</b>
<b>3.11</b>	<b>SEQUÍA EN EL PERÚ .....</b>	<b>27</b>
<b>3.12</b>	<b>EL NIÑO OSCILACIÓN DEL SUR (ENOS).....</b>	<b>28</b>
<b>IV.</b>	<b>MATERIALES Y METODOLOGÍA .....</b>	<b>31</b>
<b>4.1</b>	<b>ÁREA DE ESTUDIO .....</b>	<b>31</b>
4.1.1	Ubicación geográfica y política .....	31
<b>4.2</b>	<b>MATERIALES .....</b>	<b>33</b>
4.2.1	Información hidrológica .....	33
4.2.2	Información cartográfica .....	36
4.2.3	Información climática.....	36
4.2.4	Equipos y software .....	36
<b>4.3</b>	<b>METODOLOGÍA .....</b>	<b>37</b>
4.3.1	Información hidrométrica.....	38
4.3.2	Análisis exploratorio de datos .....	38
4.3.3	Análisis estadístico preliminar.....	39
4.3.4	Análisis de tendencia.....	39
4.3.4	Aplicación del SDI .....	40
4.3.5	Caracterización de las sequías .....	43
4.3.6	Análisis de riesgo de sequía hidrológica bajo el ENOS .....	47
<b>V.</b>	<b>RESULTADOS Y DISCUSIÓN .....</b>	<b>48</b>
<b>5.1</b>	<b>TRATAMIENTO DE DATOS.....</b>	<b>48</b>
5.1.1	Análisis exploratorio de datos .....	48
5.1.2	Agrupamiento de estaciones (Regionalización) .....	63
5.1.3	Análisis de Tendencia y quiebres .....	67

5.1.4	Cálculo del índice de sequía de caudales (SDI) .....	72
5.1.5	Análisis de riesgo de sequía en ENOS .....	111
5.1.6	Análisis de lluvia mediante SDI (SDI-lluvia).....	121
5.1.7	Análisis comparativo del SDI y SDI-lluvia .....	144
<b>VI.</b>	<b>CONCLUSIONES</b> .....	<b>159</b>
<b>VII.</b>	<b>RECOMENDACIONES</b> .....	<b>162</b>
<b>VIII.</b>	<b>BIBLIOGRAFIA</b> .....	<b>163</b>
<b>IX.</b>	<b>ANEXOS</b> .....	<b>166</b>

## ÍNDICE DE FIGURAS

Figura 1: Cuenca hidrográfica. ....	4
Figura 2: Secuencia de las sequías comúnmente aceptadas y sus efectos asociados al déficit del recurso hídrico. ....	8
Figura 3: Interacción entre la sequía Meteorológica, Agrícola, Hidrológica y socioeconómica. ....	10
Figura 4: Serie cronológica de oferta - demanda para la identificación y caracterización de las sequías. ....	12
Figura 5: a) Estaciones localizadas en la vertiente del Pacífico, b) Estaciones localizadas en la vertiente del Amazonas y c) Estaciones localizadas en la vertiente del Titicaca. ....	35
Figura 6: Proceso metodológico de la caracterización de sequía hidrológica. ....	37
Figura 7: Esquema de la serie cronológica de oferta - demanda. ....	45
Figura 8: Gráfica de cajas del caudal anual en la VP. ....	55
Figura 9: Gráfica de cajas del caudal anual en la VT. ....	56
Figura 10: Gráfica de cajas del caudal anual en K105 y SHA de la VA. ....	57
Figura 11: Gráfica de cajas del caudal anual en BOR y CHA de la VA. ....	57
Figura 12: Gráfica de cajas del caudal anual en S-RE, REQ y TAM de la VA. ....	58
Figura 13: Gráfica de cajas del caudal mensual. ....	59
Figura 14: Estaciones agrupadas con un comportamiento hidrológicamente homogéneo del caudal promedio anual (1973-2013). ....	66
Figura 15: Serie SDI periodo de avenidas de la VP. ....	79
Figura 16: Serie SDI periodo de avenidas de la VT. ....	80
Figura 17: Serie SDI periodo de avenidas de la VA. ....	81
Figura 18: Serie SDI periodo de estiaje de la VP. ....	82
Figura 19: Serie SDI periodo de estiaje de la VA. ....	83
Figura 20: Serie SDI periodo del año hidrológico de la VP. ....	84
Figura 21: Serie SDI periodo del año hidrológico de la VT. ....	85
Figura 22: Serie SDI periodo del año hidrológico de la VA. ....	85
Figura 23: Frecuencia de eventos de sequía hidrológica en el periodo de avenidas de la VP. ....	87
Figura 24: Frecuencia de eventos de sequía hidrológica en el periodo de avenidas de la VT. ....	88

Figura 25: Frecuencia de eventos de sequía hidrológica en el periodo de avenidas de la VA. .....	89
Figura 26: Frecuencia de eventos de sequía hidrológica en el periodo de estiaje de la VP.	91
Figura 27: Frecuencia de eventos de sequía hidrológica en el periodo de estiaje de la VA. .....	92
Figura 28: Frecuencia de eventos de sequía hidrológica en el periodo del año hidrológico de la VP. ....	94
Figura 29: Frecuencia de eventos de sequía hidrológica en el periodo del año hidrológico de la VT. ....	95
Figura 30: Frecuencia de eventos de sequía hidrológica en el periodo del año hidrológico de la VA.....	95
Figura 31: Extensión espacial de los estados de sequía hidrológica según el SDI en el temporada de avenidas del periodo 1982-1983.....	97
Figura 32: Extensión espacial de los estados de sequía hidrológica según el SDI en el temporada de avenidas del periodo 1989-1990.....	98
Figura 33: Extensión espacial de los estados de sequía hidrológica según el SDI en el temporada de avenidas del periodo 1991-1992.....	99
Figura 34: Extensión espacial de los estados de sequía hidrológica según el SDI en el temporada de avenidas del periodo 1997-1998.....	100
Figura 35: Extensión espacial de los estados de sequía hidrológica según el SDI en el temporada de estiaje del periodo 1982-1983.....	102
Figura 36: Extensión espacial de los estados de sequía hidrológica según el SDI en el temporada de estiaje del periodo 1989-1990.....	103
Figura 37: Extensión espacial de los estados de sequía hidrológica según el SDI en el temporada de estiaje del periodo 1991-1992.....	104
Figura 38: Extensión espacial de los estados de sequía hidrológica según el SDI en el temporada de estiaje del periodo 1997-1998.....	105
Figura 39: Extensión espacial de los estados de sequía hidrológica según el SDI en el temporada del año hidrológico del periodo 1982-1983.....	107
Figura 40: Extensión espacial de los estados de sequía hidrológica según el SDI en el temporada del año hidrológico del periodo 1989-1990.....	108
Figura 41: Extensión espacial de los estados de sequía hidrológica según el SDI en el temporada del año hidrológico del periodo 1991-1992.....	109

Figura 42: Extensión espacial de los estados de sequía hidrológica según el SDI en el temporada del año hidrológico del periodo 1997-1998.....	110
Figura 43: Serie ONI en el temporada de avenidas. ....	111
Figura 44: Serie ONI en el temporada de estiaje.....	111
Figura 45: Serie ONI en el temporada de año hidrológico.....	112
Figura 46: Mapa de riesgo de sequía hidrológica en episodio ENOS (El Niño) en el temporada de avenidas.....	116
Figura 47: Mapa de riesgo de sequía hidrológica en episodio ENOS (El Niño) en el temporada de estiaje. ....	118
Figura 48: Mapa de riesgo de sequía hidrológica en episodio ENOS (El Niño) en el temporada del año hidrológico. ....	120
Figura 49: Serie SDI-lluvia periodo de avenidas de la VP. ....	126
Figura 50: Serie SDI-lluvia periodo de estiaje de la VP.....	127
Figura 51: Serie SDI-lluvia periodo del año hidrológico de la VP. ....	128
Figura 52: Extensión espacial de los estados de sequía de lluvias según el SDI-lluvia en la temporada de avenidas del periodo 1982-1983.....	130
Figura 53: Extensión espacial de los estados de sequía de lluvias según el SDI-lluvia en la temporada de avenidas del periodo 1989-1990.....	131
Figura 54: Extensión espacial de los estados de sequía de lluvias según el SDI-lluvia en la temporada de avenidas del periodo 1991-1992.....	132
Figura 55: Extensión espacial de los estados de sequía de lluvias según el SDI-lluvia en la temporada de avenidas del periodo 1997-1998.....	133
Figura 56: Extensión espacial de los estados de sequía de lluvias según el SDI-lluvia en la temporada de estiaje del periodo 1982-1983.....	135
Figura 57: Extensión espacial de los estados de sequía de lluvias según el SDI-lluvia en la temporada de estiaje del periodo 1989-1990.....	136
Figura 58: Extensión espacial de los estados de sequía de lluvias según el SDI-lluvia en la temporada de estiaje del periodo 1991-1992.....	137
Figura 59: Extensión espacial de los estados de sequía de lluvias según el SDI-lluvia en la temporada de estiaje del periodo 1997-1998.....	138
Figura 60: Extensión espacial de los estados de sequía de lluvias según el SDI-lluvia en la temporada del año hidrológico del periodo 1982-1983.....	140

Figura 61: Extensión espacial de los estados de sequía de lluvias según el SDI-lluvia en la temporada del año hidrológico del periodo 1989-1990.....	141
Figura 62: Extensión espacial de los estados de sequía de lluvias según el SDI-lluvia en la temporada del año hidrológico del periodo 1991-1992.....	142
Figura 63: Extensión espacial de los estados de sequía de lluvias según el SDI-lluvia en la temporada del año hidrológico del periodo 1997-1998.....	143
Figura 64: Mapa comparativo entre SDI y SDI-lluvia en la temporada de avenidas del periodo 1982-1983.....	145
Figura 65: Mapa comparativo entre SDI y SDI-lluvia en la temporada de avenidas del periodo 1989-1990.....	146
Figura 66: Mapa comparativo entre SDI y SDI-lluvia en la temporada de avenidas del periodo 1991-1992.....	147
Figura 67: Mapa comparativo entre SDI y SDI-lluvia en la temporada de avenidas del periodo 1997-1998.....	148
Figura 68: Mapa comparativo entre SDI y SDI-lluvia en la temporada de estiaje del periodo 1982-1983.....	150
Figura 69: Mapa comparativo entre SDI y SDI-lluvia en la temporada de estiaje del periodo 1989-1990.....	151
Figura 70: Mapa comparativo entre SDI y SDI-lluvia en la temporada de estiaje del periodo 1991-1992.....	152
Figura 71: Mapa comparativo entre SDI y SDI-lluvia en la temporada de estiaje del periodo 1997-1998.....	153
Figura 72: Mapa comparativo entre SDI y SDI-lluvia en la temporada del año hidrológico del periodo 1982-1983.....	155
Figura 73: Mapa comparativo entre SDI y SDI-lluvia en la temporada del año hidrológico del periodo 1989-1990.....	156
Figura 74: Mapa comparativo entre SDI y SDI-lluvia en la temporada del año hidrológico del periodo 1991-1992.....	157
Figura 75: Mapa comparativo entre SDI y SDI-lluvia en la temporada del año hidrológico del periodo 1997-1998.....	158

## ÍNDICE DE TABLAS

Tabla 1: Clasificación de sequías hidrológicas de Palmer. ....	14
Tabla 2: Clasificación de la sequía hidrológica RDI. ....	14
Tabla 3: Definición de estados de sequía hidrológica según el SDI. ....	17
Tabla 4: Valores críticos del coeficiente de asimetría de test de normalidad.....	26
Tabla 5: Eventos climáticos en el Perú, 1950 – 1998.....	27
Tabla 6: Clasificación del Índice Oceánico El Niño (ONI).....	30
Tabla 7: Episodios históricos El Niño y La Niña basado en el ONI. ....	30
Tabla 8: Unidades Hidrográficas del Perú.....	32
Tabla 9: Red de Estaciones Hidrométricas con información mensual completa.....	49
Tabla 10: Resumen de la Estadística descriptiva de caudales anuales (m <sup>3</sup> /s).....	54
Tabla 11: Resumen de Test de Grubbs para las 22 estaciones.....	60
Tabla 12: Resumen de regiones homogéneas formadas por el MVR.....	63
Tabla 13: Resumen del Test de Mann Kendall para el análisis de Tendencia. ....	69
Tabla 14: Resumen del Test de T-Student y Cusum para el análisis de homogeneidad. ....	71
Tabla 15: Coeficiente de asimetría de los caudales acumulados y de su logaritmo natural.	74
Tabla 16: Estados del SDI de las estaciones evaluadas en la temporada de avenidas.....	76
Tabla 17: Estados del SDI de las estaciones evaluadas en la temporada de estiaje. ....	77
Tabla 18: Estados del SDI de las estaciones evaluadas en la temporada del año hidrológico. .....	78
Tabla 19: Frecuencia de eventos de sequía hidrológica en la en temporada de avenidas. ..	86
Tabla 20: Frecuencia de eventos de sequía hidrológica en temporada de estiaje.....	90
Tabla 21: Frecuencia de eventos de sequía hidrológica en el año hidrológico. ....	93
Tabla 22: Resumen de análisis de riesgo de sequía hidrológica en los episodios ENOS en temporada de avenidas.....	113
Tabla 23: Resumen de análisis de riesgo de sequía hidrológica en los episodios ENOS en temporada de estiaje. ....	113
Tabla 24: Resumen de análisis de riesgo de sequía hidrológica en los episodios ENOS en temporada del año hidrológico. ....	114
Tabla 25: Coeficiente de asimetría de las lluvias acumuladas y de su logaritmo natural.	122
Tabla 26: Estados del SDI-lluvia en la temporada de avenidas. ....	123
Tabla 27: Estados del SDI-lluvia en la temporada de estiaje. ....	124
Tabla 28: Estados del SDI-lluvias en la temporada año hidrológico. ....	125

## ÍNDICE DE ANEXOS

Anexo 1: Pruebas estadísticas implementadas. ....	166
Anexo 2: Análisis exploratorio de datos mensuales. ....	172
Anexo 3: Regiones estadísticamente homogéneas. ....	176
Anexo 4: Características de sequías. ....	180
Anexo 5: Índice Oceánico de El Niño (ONI). ....	191
Anexo 6: Mapa de riesgo de sequía hidrológica - ENOS (La Niña). ....	192
Anexo 7: Cuadro comparativo entre SDI-lluvia y SDI-caudales .....	195



## RESUMEN

La sequía es un fenómeno natural que se produce en todo el mundo cuando la disponibilidad del recurso hídrico es significativamente inferior a los niveles normales durante un periodo de tiempo significativo y no puede satisfacer la demanda hídrica. Este trabajo se centró en la sequía hidrológica definida por el índice de sequía de caudales (SDI por sus siglas en inglés) durante períodos de avenidas, estiaje y el año hidrológico de 22 estaciones hidrométricas distribuidas en las tres vertientes hidrográficas del Perú durante el período 1973-2013. Se encontró que alguna de las series de volumen del caudal no siguió la distribución normal. Se examinaron las series acumuladas aplicando el logaritmo natural y mediante una prueba de normalidad en la que se utilizó el coeficiente de asimetría basado en la condición que este sea una serie normal, se definió la serie que más se ajuste al paso de los datos del caudal. Los resultados del análisis de sequía hidrológica basado en el SDI mostraron que casi todas las estaciones sufrieron sequías hidrológicas durante el período de estudio. Además, se detectó que las sequías extremas ocurrieron con mayor frecuencia entre 1989-1992. Asimismo se encontró una incidencia de riesgo de sequía hidrológica en episodios del El Niño - Oscilación del Sur (ENOS).

**PALABRAS CLAVES:** *Sequía hidrológica, índice de sequía de caudales, El Niño-Oscilación del Sur (ENOS), Vertiente hidrográfica del Perú.*

## ABSTRACT

Drought is a natural phenomenon that occurs throughout the world where the availability of water resources is significantly below normal levels for a significant period of time and cannot meet the water demand. This work focused on the hydrological drought defined by the flow drought index (SDI acronym) during periods of flood, drought and hydrological year of 22 hydrometric stations distributed in the three hydrographic slopes of Peru during the period 1973- 2013. It was found that one of the series of flow volume did not follow the normal distribution. Cumulative series examined by applying the natural logarithm and using a normality test the Skewness Coefficient based on the condition that if the series is normal, was used in the series that best suits the passage of data flow is defined. The results of analysis of hydrological drought based on the SDI showed that almost all seasons hydrological drought suffered during the study period. In addition, it was found that extreme droughts occurred more frequently between 1989 -1992. Southern Oscillation (ENSO) - also an incidence risk of hydrological drought in episodes of El Niño was found.

**KEYWORDS:** *hydrological drought, Streamflow Drought Index (SDI), El Niño/Southern Oscillation (ENSO), Hydrographic slope of Peru.*

## **I. INTRODUCCIÓN**

Las sequías se presentan en gran parte del mundo cada vez con mayor frecuencia (UNESCO, 1979). Este fenómeno natural se produce cuando la disponibilidad hídrica es significativamente inferior a los niveles normales durante un período de tiempo representativo, el mismo que es insuficiente para satisfacer la demanda de las actividades humanas y del medio ambiente.

Las sequías resultan de condiciones hídricas en las que prevalece la escasez de agua como resultado de precipitaciones insuficientes en una serie de meses o años sucesivos. La cantidad de lluvia disminuye el promedio y en consecuencia se empobrecen las pasturas, disminuye el rendimiento de los cultivos, y hay falta de agua para la gente y los animales (Durán, 2001).

Este déficit de precipitación se puede acumular rápidamente en un periodo de tiempo, o pueden pasar meses ante la carencia comienza a aparecer en los caudales reducidos, niveles de los embalses o el aumento profundidad de la napa freática subterránea (Badripour, 2007). Aunque no es una definición universal de la sequía, en el sentido más general, la sequía se puede definir con diferente perspectivas disciplinarias, a saber, la sequía meteorológica, sequía agrícola, sequía hidrológica y la sequía socioeconómica (Yang, 2010). Los tres primeros grupos podrían definirse como fenómeno físico. El último grupo se ocupa de la sequía en términos de oferta y demanda, el seguimiento de los efectos de la escasez de agua, ya que ondula a través de los sistemas socioeconómicos (Wilhite y Glantz, 1985).

La sequía se presenta de manera recurrente, con periodicidad inexacta y grados de intensidad diferentes, a través de los años. Diversas zonas del Perú han confrontado serios problemas, derivados de la falta de lluvias dando como consecuencia la escasez de agua en los valles. Este fenómeno afecta de manera sensible a la ganadería, agricultura y a la familia campesina y sus consecuencias afectan el desarrollo económico del país.

En ese sentido la forma más sencilla para el seguimiento de las condiciones de sequía es el uso de índices de sequía, ya que proporcionan un método cuantitativo para determinar el inicio y el final de un evento de sequía, debido a que el valor del índice indica el nivel de severidad de la sequía.

Dentro de la gama de índices de sequía que se han desarrollado para caracterizar las sequías hidrológicas se encuentra el *índice de sequía de caudales*<sup>1</sup>, desarrollado recientemente por Nalbantis y Tsakiris (2008), es un índice muy simple y eficaz para categorizar las sequías hidrológicas. Considerando la limitada investigación disponible sobre la sequía hidrológica basada en el SDI, se desarrolla el presente estudio con la finalidad de validar la metodología propuesta y fundamentalmente sustentarla como herramienta en un contexto del cambio climático con énfasis en la evaluación de la sequía hidrológica en temporada de avenidas, de estiaje y para el año hidrológico. Para ello se consideró una serie histórica de caudales promedio mensuales del periodo de 1973-2013, correspondiente a veintidós estaciones hidrométricas del Perú.

---

<sup>1</sup> *Streamflow Drought Index (SDI)*, Nalbantis y Tsakiris (2008), o traducida al español como el índice sequía de caudales.

## **II. OBJETIVOS DE LA INVESTIGACIÓN**

### **2.1 OBJETIVO PRINCIPAL**

- Caracterizar espacial y temporalmente la sequía hidrológica en veintidós cuencas hidrográficas seleccionadas y distribuidas en las tres vertientes hidrográficas del Perú mediante el índice de sequía de caudales.

### **2.2 OBJETIVOS ESPECÍFICOS**

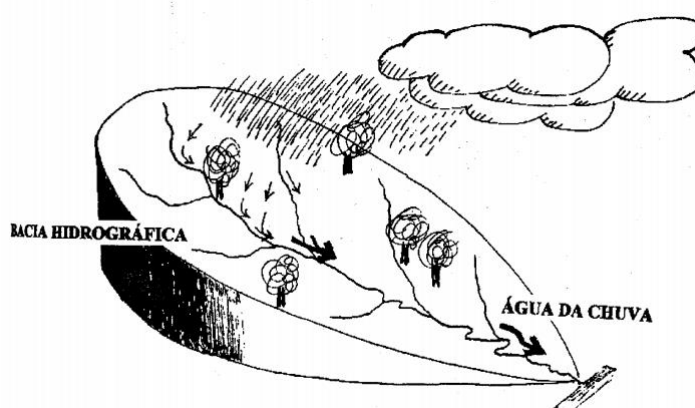
- Realizar el análisis exploratorio de datos de caudales mensuales en las veintidós estaciones hidrométricas seleccionadas; con una cobertura espacial y temporal representativa de las tres vertientes hidrográficas del Perú.
- Proponer el índice de sequía de caudales (SDI) como indicador para la caracterización espacial y temporal de las sequías hidrológicas para las temporadas de avenidas, estiaje y como el año hidrológico ocurridas entre los años 1973–2013 en las veintidós cuencas hidrográficas seleccionadas y distribuidas en las tres vertientes hidrográficas del Perú.
- Evaluar las sequías hidrológicas registradas de los resultados del índice de sequía de caudales (SDI) en los periodos de evaluación con incidencia en episodios El Niño – Oscilación del Sur (ENOS) ocurridos.

### III. REVISIÓN BIBLIOGRÁFICA

#### 3.1 CUENCA HIDROGRÁFICA Y EVENTOS EXTREMOS

Una cuenca hidrográfica de un curso de agua es un área de captación natural del agua de la precipitación que hace converger los escurrimientos hacia un único punto de salida, su exutorio. Está compuesta básicamente por un conjunto de superficies vertientes de una red de drenaje formada por cursos de agua que confluyen hasta resultar en un lecho único en el exutorio.

Cuenca hidrográfica es, por tanto, un área definida topográficamente, drenada por un curso de agua o por un sistema conectado de cursos de agua, de modo tal que todo el caudal efluente es descargado por una simple salida. Se puede considerar un sistema físico donde la entrada es el volumen de agua precipitado y la salida es el volumen de agua escurrido por el exutorio (**Figura 1**), considerándose como pérdidas intermedias los volúmenes evaporados y traspirados, y también los infiltrados profundamente.



**Figura 1: Cuenca hidrográfica.**

FUENTE: Pedrazzi (2003)

Los eventos extremos son fenómenos meteorológicos naturales que se pueden presentar en cualquier lugar y momento, las sequías como las inundaciones son resultado de alteraciones en la dinámica de la humedad atmosférica, Velasco, (2013). La naturaleza de ambos fenómenos es compleja, mientras una parte sufre sequía, otra puede encontrarse inundada, simultáneamente (Velasco, 2013). Se denomina evento extremo al evento hidroclimático (inundación y/o sequía) que tiene muy baja probabilidad de ocurrencia, es un episodio raro que se presenta en un lugar y en una época en particular, un evento extremo puede considerarse cuando el cuantil es superior e inferior a los percentiles 90 o 10 de una función de probabilidad (IPCC, 2009)

Algunos de los eventos extremos que alteran el proceso del ciclo hidrológico y por ende la humedad atmosférica son: El Niño, las erupciones volcánicas, la quema de combustibles fósiles, la deforestación y la actividad industrial (Velasco, 2013).

Considerando que los eventos hidroclimáticos extremos (sequías y/o inundaciones) son las manifestaciones más dramáticas en el ciclo hidrológico, es de esperar que estos fenómenos aumenten en intensidad, severidad y duración, atribuidas al cambio climático, incrementando la frecuencia de ocurrencia así como el impacto que ocasiona en la sociedad (Velasco, 2013).

### **3.1.1 Estación hidrométrica**

Es un lugar fijo en una sección del río donde se realizan un conjunto de operaciones que permitan determinar el caudal circulante en momento y tiempo determinado. Estas estaciones deben ser ubicadas en zonas de fácil acceso donde el lecho del río sea estable es decir que no se erosione, sedimente, o inunde fácilmente y donde el tramo sea lo más recto posible (50 m aguas arriba y aguas abajo de la estación), y así evitar distorsión en la información obtenida.

### **3.1.2 Caudal**

Se define como el volumen de agua que pasa por la sección transversal del cauce por unidad de tiempo, y se expresa en  $m^3/s$  o  $l/s$ . La caudaloidad suele ser mayor en la desembocadura del río, siempre que no se produzcan filtraciones o que la evaporación haya disminuido su caudal.

### 3.2 SEQUÍAS

De acuerdo con la Organización Meteorológica Mundial (OMM), la sequía es considerada como un periodo de condiciones meteorológicas anormales secas, suficientemente prolongado como para que la falta de precipitación cause un grave desequilibrio hidrológico (OMM, 2006).

La convención de las Naciones Unidas de Lucha contra la Desertificación (CLD), 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 (CLD, 2004).

Las sequías son percibidas como eventos extremos del sistema climático; sin embargo, deberían ser consideradas como sucesos de ocurrencia normal puesto que estos eventos han ocurrido muchas veces y continuarán presentándose, además que debido al continuo incremento de las necesidades de agua a nivel mundial serán más continuas en el futuro con adversas consecuencias en la sociedad. Por este motivo el manejo de los impactos de las sequías deberían ser abordados utilizando análisis de riesgo en vez de un manejo de la crisis, procedimiento que es la práctica actual de muchos países (Panu & Sharma, 2002).

Quispe, et al. (2001), indican que, para la caracterización de las sequías existen procedimientos diversos, pero los más consolidados consisten en establecer una función de suministro u oferta del recurso en el tiempo, junto a una función de demanda del recurso (Yevjevich, 1967). En aquella unidad elemental de tiempo en que la demanda supera el suministro, se considera que se produce un fallo, y por lo tanto se está en situación de sequía. El período de tiempo consecutivo con fallo se define como una sequía única, la cual se puede caracterizar por su duración, su intensidad y su magnitud. Los estadísticos sobre frecuencia de fallos, duración de las sequías, intensidad y severidad han sido tradicionalmente utilizados como índices para caracterizar las sequías hidrológicas. También se ha caracterizado las sequías en su dimensión espacial mediante la “extensión” y en ambos aspectos, espacial y temporal, con el “tamaño” como los desarrollados por Fernández (1991) y Alzira (1983).

Fernández y Donoso (2000), dicen que, la sequía se define como un evento en que la demanda supera a la oferta de agua, generándose un déficit que tiene asociado un daño; si no hay daño, no se habla de sequía, aun cuando haya déficit. El concepto de sequía tiene



varias aplicaciones; se habla de sequías meteorológicas, cuando hay escasez de lluvias, y de sequías hidrológicas, cuando hay escasez de caudales. Cada evento de sequía queda caracterizado básicamente por la duración del déficit, la intensidad del déficit y la magnitud del déficit. El análisis espacial continuo de estos eventos permite, además, determinar el área de influencia espacial de cada sequía.

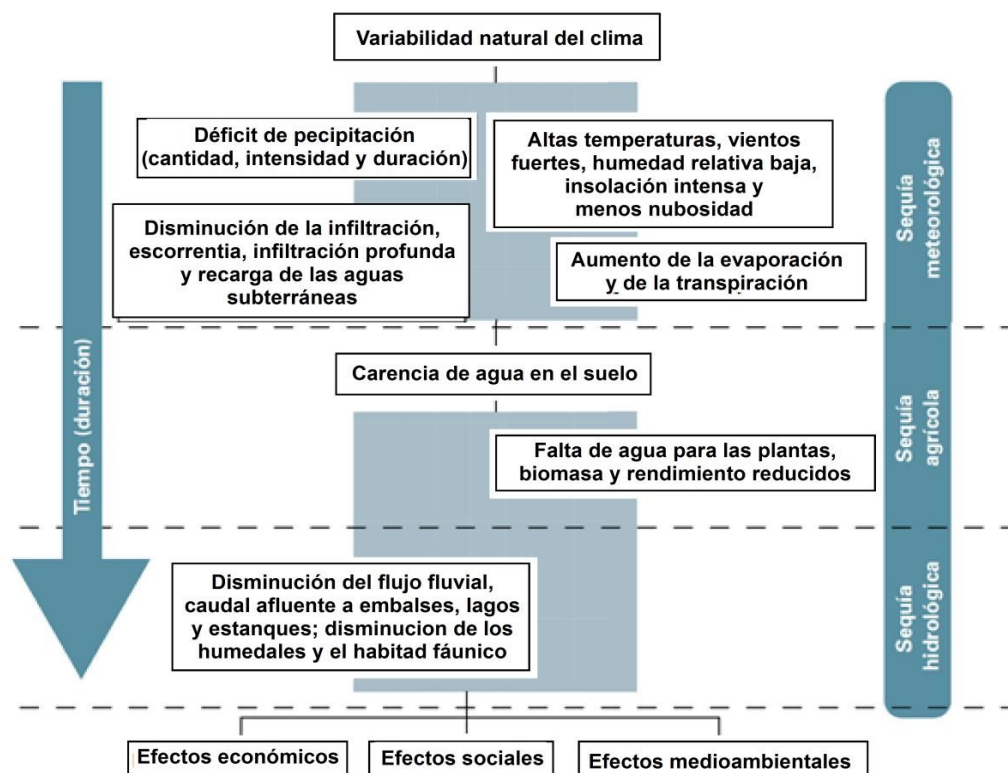
Mendoza (1994), manifiesta que, las sequías es un fenómeno frecuentemente mencionado como el causante de grandes catástrofes en la economía andina, motiva que las autoridades reiteradamente declaren en emergencia la agricultura.

Chow (1994), manifiesta que los sistemas hidrológicos son afectados algunas veces por eventos extremos, tales como tormentas severas, crecientes y sequías. La magnitud de un evento extremo esta inversamente relacionada con su frecuencia de ocurrencia, es decir, eventos muy severos ocurren con menor frecuencia que eventos más moderados. El objetivo del análisis de frecuencia de información hidrológica es relacionar la magnitud de los eventos extremos con su frecuencia de ocurrencia mediante el uso de distribución de probabilidades. Se supone que la información hidrológica analizada es independiente y está idénticamente distribuida, y el sistema hidrológico que la produce se considera estocástico, independiente del espacio tiempo.

### 3.3 TIPOS DE SEQUÍA

Las sequías tienen su origen dentro del ciclo hidrológico con una deficiencia de la cantidad de precipitación, el cual provoca de forma directa una disminución de la presencia de agua en todos los estados del ciclo hidrológico, Brass, (1990). A esta deficiencia de la precipitación puede sumarse factores como una alta temperatura, presencia de fuertes vientos, una baja humedad relativa con una alta radiación solar, características del suelo y cobertura vegetal. Todo ello tiene en común el aumento de la evaporación y la transpiración que acentúa la disminución de la presencia de agua en la superficie terrestre y en el proceso del ciclo hidrológico.

Se han propuesto diferentes clasificaciones que catalogan a estas definiciones según el área afectada, por ejemplo Wilhite & Glantz (1985), agruparon diversas definiciones de sequías, en cuatro grupos según la disciplina científica desde la cual se analiza al fenómeno: sequía meteorológica, sequía agrícola, sequía hidrológica y la sequía socioeconómica. Las relaciones entre los tipos de sequías se muestran en la **Figura 2**.



**Figura 2: Secuencia de las sequías comúnmente aceptadas y sus efectos asociados al déficit del recurso hídrico.**

FUENTE: OMM (2006)

### **3.3.1 Sequía Meteorológica o Climatológica**

La sequía meteorológica se relaciona con la disminución de las precipitaciones, siendo evaluadas 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 la sequía meteorológica que han sido desarrolladas para regiones específicas, debido a que las variaciones en los regímenes de precipitación tienen una fuerte influencia de las características climáticas de cada región.

### **3.3.2 Sequía Edáfica o agrícola**

La sequía agrícola se expresa en términos de disponibilidad de agua en los suelos para el sostenimiento de los cultivos, en muchos casos es valorada de acuerdo a los daños provocados sobre la producción agrícola.

Debido a que la cantidad de agua es diferente para cada cultivo y varía a lo largo de las fases de crecimiento de los cultivos, 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. Por lo que no es equivalente a la sequía meteorológica. Si los niveles de humedad del suelo son suficientes para sustentar el crecimiento de un determinado cultivo durante el periodo que se presente sequía meteorológica, la sequía agrícola no se producirá.

### **3.3.3 Sequía Hidrológica**

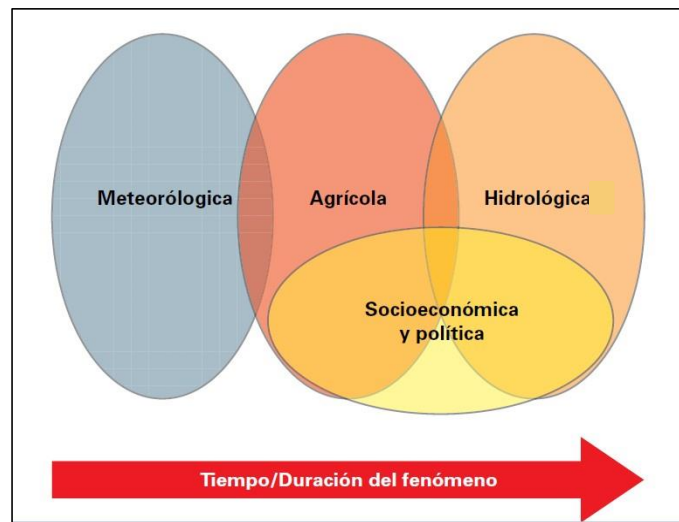
La sequía hidrológica se asocia fuertemente a la deficiencia en el caudal o volumen de aguas superficiales y/o subterráneas, así como el volumen de almacenamientos. La sequía hidrológica tiene un desfase de ocurrencia en relación con la sequía meteorológica, puesto que se requiere de un desfase temporal para que se propaguen las anomalías pluviométricas a los diversos componentes del ciclo hidrológico.

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 incluso años dependiendo de la región desde el momento que se inició de la sequía meteorológica, y si las lluvias retornan en poco tiempo, la sequía hidrológica no llegará a manifestarse.

La capacidad de gestión de los recursos hídricos influye sobre la sequía hidrológica, debido a que el déficit no solo depende de la disponibilidad del recurso hídrico superficial o subterráneo, sino también de la forma de uso del agua.

### 3.3.4 Sequía Socio Económica

Este tipo de sequía se produce cuando la disponibilidad de agua disminuye hasta el punto de generar daños económicos o sociales sobre la población en las zonas afectadas por la escasez de precipitaciones.



**Figura 3: Interacción entre la sequía Meteorológica, Agrícola, Hidrológica y socioeconómica.**

FUENTE: OMM (2006)

### 3.4 CARACTERIZACIÓN DE SEQUÍAS

La caracterización de las sequías presenta rasgos individuales distintivos, para su identificación se propuso la teoría de rachas o sucesiones propuesta por Yevjevich (1967), mencionado por García (2008). Esta analiza las sequías en base a los procesos espacio temporales que consideran la oferta y la demanda del recurso hídrico en una región. La diferencia en una serie cronológica, representa la disponibilidad del recurso hídrico, mientras que la necesidad de hacer uso de este recurso identifica las sequías.

La teoría de rachas permite la caracterización de una serie de episodio seco en base a tres características principales como son: duración, magnitud y área afectada (Lorenzo, 2012).

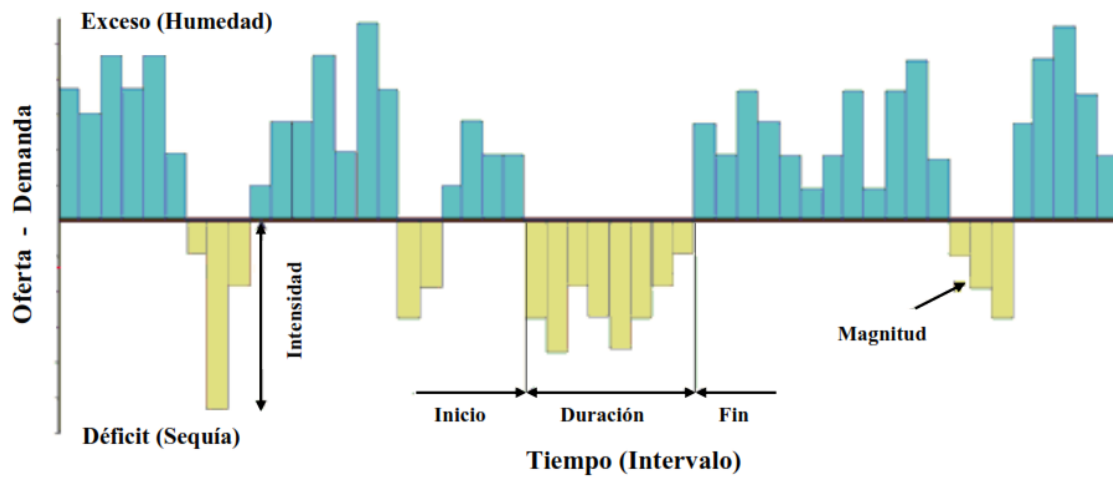
#### 3.4.1 Duración de la sequía

La duración de un evento de sequía, se define como el número de sucesiones temporales consecutivas e ininterrumpidas (uno o más meses) con un caudal inferior al nivel promedio registrado en un periodo de tiempo relativamente largo.

#### 3.4.2 Magnitud de la sequía

Este término hace referencia al déficit del volumen acumulado de caudal en una secuencia ininterrumpida de meses que delimita un evento de sequía, el cual se cuantifica mediante la sucesión negativa acumulada.

Hay un parámetro muy usual que se utiliza en la caracterización de sequías que viene ser la **intensidad**. La cual es una medida de severidad del evento, algunos autores la calculan como la magnitud entre la duración de la sequía y corresponde entonces a la intensidad promedio, en otros casos se define como el máximo valor del déficit ocurrido durante el evento, conocido como intensidad máxima.



**Figura 4: Serie cronológica de oferta - demanda para la identificación y caracterización de las sequías.**

FUENTE: Fernández (1997)

### 3.4.3 Extensión de la sequía

La caracterización espacial de un evento de sequía, nos ayuda a entender la evolución, el inicio y el fin de este fenómeno, e identificar las zonas con mayor riesgo a sufrir temporadas secas, lo suficientemente severas como para ocasionar un grave desequilibrio hidrológico en un área extensa.

### 3.5 ÍNDICES DE SEQUÍAS

Los índices de sequía son medidas cuantitativas que caracterizan los niveles de sequía por la asimilación de los datos de una o varias variables (indicadores) como la precipitación, evapotranspiración o caudales en un único valor numérico. Estos índices dan mayor facilidad para entender las sequías. La naturaleza de los índices de sequía refleja las distintas situaciones y condiciones; que pueden reflejar las anomalías de sequedad del clima (basadas principalmente en la precipitación) o corresponden a impactos agrícolas e hidrológicos tales como la pérdida de humedad del suelo o bajos niveles de los ríos y embalses. Además, la categorización de los índices de sequías puede ser basada también en los datos y la tecnología utilizada.

#### 3.5.1 Índice de sequía hidrológica de Palmer

Karl y Knight (1985) mencionaron que un índice de tipo hidrológico que caracterice la situación de sequedad a partir del flujo superficial, humedad del suelo, niveles de lagos, embalses y acuíferos en un modelo hidrológico conceptual fue desarrollado con el nombre de Índice de sequía Hidrológico de Palmer (*Palmer Hydrological Drought Index, PHDI*).

Este índice surge de introducir modificaciones al PDSI, destinadas a detectar anomalías de humedad que afectan a la corriente de agua superficial. El PHDI evoluciona muy lentamente de un mes a otro, de tal forma que no muy útil para detectar las sequías meteorológicas, ya que las reservas de agua no empiezan a resultar afectadas hasta que esta se ha prolongado en el tiempo.

De igual forma, los valores del PHDI permanecen negativos meses después de que el PDSI retorne a valores próximos a cero, dado el tiempo necesario de recarga de las reservas hídricas. En cualquier caso, los valores de PDSI y PHDI son casi equivalentes, manteniendo los mismos valores de referencia para definir las situaciones de sequía (Valiente, 2001).

La **Tabla 1** muestra la clasificación de las sequías desarrollada por Palmer, mencionado por Karl & Knight (1985), mencionan valores negativos indican condiciones de sequía, teóricamente el índice es cero en todas las estaciones del año.

**Tabla 1: Clasificación de sequías hidrológicas de Palmer.**

<b>Índice PHDI</b>	<b>Clasificación de sequía</b>
$0 < \text{PHDI} \leq -0.49$	Condición Normal
$-0.5 < \text{PHDI} \leq -0.99$	Sequía incipiente
$-1.0 < \text{PHDI} \leq -1.99$	Sequía Débil
$-2.0 < \text{PHDI} \leq -2.99$	Sequía Moderada
$-3.0 < \text{PHDI} \leq -3.99$	Sequía Severa
Menores de -4.00	Sequía Extrema

FUENTE: Palmer (1965)

### 3.5.2 Índice de sequía – demanda

Desarrollado por Weghorst (1996), el índice de sequía – demanda (*Reclamation Drought Index*, RDI), permite conocer el equilibrio entre la oferta y demanda hídrica. Ha sido recientemente desarrollado como una herramienta para la definición de la severidad, duración, inicio y final de un evento de sequía (Valiente, 2001).

De igual forma que el Índice de Disponibilidad de Agua Superficial (SWSI), el RDI es un indicador de la sequía hidrológica que se determina dentro del ámbito de la cuenca e incorpora la precipitación, el flujo de los ríos, las masas de nieve, y los almacenamientos como componentes del estado del suministro de agua.

El RDI difiere del SWSI en que incluye en la construcción de índice a la temperatura, la demanda y la duración de la sequía. El RDI se adapta a cada región en particular y su ventaja es la capacidad para incluir condiciones climáticas y factores de suministro de agua, pero por ser un indicador específico las comparaciones entre cuencas son limitadas.

**Tabla 2: Clasificación de la sequía hidrológica RDI.**

<b>Índice de RDI</b>	<b>Clasificación</b>
Menos de -4.00	Sequía severa
$-4.00 < \text{RDI} \leq -1.50$	Sequía moderada
$-1.50 < \text{RDI} \leq 0.00$	Sequía normal a sequía suave
$0.00 < \text{RDI} \leq 1.50$	Sequía normal a humedad suave
$1.50 < \text{RDI} \leq 4.00$	Humedad moderada
Más de 4.00	Humedad extrema

FUENTE: Weghorst (1996)



### **3.5.3 Índice agregado de sequías**

El índice agregado de sequías (*Aggregate Drought Index*, ADI), fue propuesto por Keyantash & Dracup (2004), para la evaluación agregada de la ocurrencia de sequías en su forma meteorológica, hidrológica y agrícola, de forma similar al SWSI el índice se aplica sobre una región en particular y utiliza la precipitación, evapotranspiración, caudales, niveles en lagos y embalses, humedad en el suelo y las masas de nieve, que son las componentes de agua superficial del ciclo hidrológico.

El cómputo del índice requiere de una transformación estadística inicial de cada variable para normalizarla y estandarizarla, sobre el conjunto de variables se realiza un análisis de componentes principales, correspondiendo el ADI con los pesos tipificados de la primera componente. Al igual que el SWSI el índice ADI tiene limitaciones especialmente en la falta de homogeneidad que puede aparecer en la serie de diferentes regiones (Gonzalez, 2005).

### **3.5.4 Índice de escorrentía estandarizado**

McKee et al., (1993) Introdujeron el SPI, y sugirió que el método podría ser aplicado a otras variables hidrometeorológicas relacionadas a la sequía como complemento para representar los aspectos hidrológicos de la sequía.

El cálculo del índice de escorrentía estandarizada (*Standardized runoff index*, SRI) es idéntico al cálculo de SPI, fue desarrollado por Shukla & Wood (2008), este análisis incorpora los procesos hidrológicos que determinan la pérdida estacional de caudal debido a la influencia del clima. Como resultado de ello en el mes para una escala de tiempo estacional, el SRI es un complemento útil de SPI para representar aspectos hidrológicos de las sequías Damberg (2013).

### 3.5.5 Índice de sequía de caudales

El índice de sequía de caudales (SDI) ha sido desarrollado por Nalbantis y Tsakiris (2008) para la caracterización de la sequía hidrológica. El SDI analiza de forma simple y eficaz el estado de sequía de una determinada unidad hidrográfica. El análisis de sequías de caudales bajo este método se basa en los volúmenes de caudales acumulados por períodos de tres, seis, nueve y doce meses que se superponen dentro de cada año hidrológico. Permite la definición de los estados de sequía que se modelan como una cadena de Markov no estacionario.

Se supone que una serie temporal de los volúmenes de caudal mensual  $Q_{i,j}$  está disponible donde  $i$  denota el año hidrológico y  $j$  del mes dentro de ese año hidrológico ( $j = 1$  para primer mes de análisis y  $j = 12$  para para el último mes de análisis del año). Basado en esta serie se obtiene:

$$V_{i,k} = \sum_{j=1}^{3k} Q_{i,j} \quad i = 1, 2 \dots \quad j = 1, 2 \dots, 12 \quad k = 1, 2, 3, 4 \quad (1)$$

Donde  $V_{i,k}$  es el volumen acumulado de caudales para el año hidrológico de orden  $i$  y el período de referencia de orden  $k$ .

Sobre la base de los volúmenes acumulados de caudales  $V_{i,k}$  el índice de sequía de caudales (SDI) se define para cada período de referencia  $k$  del año hidrológico número  $i$  de la siguiente manera:

$$SDI_{i,k} = \frac{V_{i,k} - \bar{V}_k}{s_k} \quad i = 1, 2, \dots, \quad k = 1, 2, 3, 4 \quad (2)$$

Donde  $\bar{V}_k$  y  $s_k$  son respectivamente, la media y la desviación estándar del caudal acumulado, el volumen acumulado de caudales de período de referencia  $k$  ya que estos se estiman durante un largo período de tiempo. En esta definición el nivel de truncamiento se establece en  $\bar{V}_k$  aunque podrían utilizarse otros valores.

El índice de sequía hidrológica de la ecuación 2 es idéntico al volumen del caudal normalizado. Esto no es del todo nuevo ya que Ben-Zvi (1987) hizo uso de los volúmenes de caudales anuales estandarizados.

En general, para las pequeñas cuencas, los caudales pueden seguir una distribución de probabilidad sesgada que bien se puede aproximar por la familia de las funciones de

distribución Gamma. La distribución se transforma entonces en normal. En este trabajo se utiliza la distribución logarítmica normal de dos parámetros para los que la normalización es simple: basta tomar logaritmos naturales de caudales. El índice se define como SDI.

$$SDI_{i,k} = \frac{y_{i,k} - \bar{y}_k}{S_{y,k}} \quad i = 1, 2, \dots, \quad k = 1, 2, 3, 4 \quad (3)$$

Dónde:

$$y_{i,k} = \ln(V_{i,k}), \quad i = 1, 2, \dots, \quad k = 1, 2, 3, 4 \quad (4)$$

Son los logaritmos naturales de caudal acumulado con la media  $\bar{y}_k$  y la desviación estándar  $S_{y,k}$  como estas estadísticas son estimados durante un largo período de tiempo.

Los valores SDI positivos reflejan condiciones de no sequía mientras que los valores negativos indican sequías hidrológica. En base al SDI, se definen en cinco estados de sequía hidrológica indicados por un número entero que va de 0 (No sequía) a 4 (sequía extrema) se definen a través de los criterios de la **Tabla 3**.

**Tabla 3: Definición de estados de sequía hidrológica según el SDI.**

<b>Estado</b>	<b>Descripción</b>	<b>Criterio</b>	<b>Probabilidad (%)</b>
0	No sequía	$SDI \geq 0.0$	50.0
1	Sequía leve	$-1.0 \leq SDI < 0.0$	34.1
2	Sequía moderada	$-1.5 \leq SDI < -1.0$	9.2
3	Sequía severa	$-2.0 \leq SDI < -1.5$	4.4
4	Sequía extrema	$SDI < -2.0$	2.3

FUENTE: Nalbantis y Tsakiris (2009)

### **3.6 VERTIENTES HIDROGRÁFICAS DEL PERÚ**

La variada orografía del territorio, definida por la presencia de la Cordillera de Los Andes, extendida longitudinalmente de sur a norte; configura un conjunto de unidades hidrográficas (159) que contienen a la red de drenaje conformada por 1007 ríos que conducen un volumen promedio anual de 2046 km<sup>3</sup> de escurrimiento superficial, los cuales agrupados en función del *divortium aquarum* o línea divisoria mayor de las aguas, conforman las tres grandes vertientes que caracterizan al territorio nacional, denominadas Pacífico (62 unidades), Atlántico (84 unidades) y Lago Titicaca (13 unidades).

#### **3.6.1 Vertiente del Pacífico**

La vertiente del Pacífico se extiende desde los *divortium aquarum* occidental de la Hoya del Titicaca y de la cadena occidental de la Cordillera de Los Andes hasta la línea del litoral del mar peruano, ocupando el 21,8% de la superficie del territorio nacional.

En este ámbito se distinguen 84 unidades hidrográficas que descargan al Océano Pacífico 1,8% de las disponibilidades hídricas anuales que dispone el Perú, a través de cuencas cortas con ríos de carácter estacional, fuerte pendiente, régimen irregular y flujo torrencioso; marcando dos períodos bien definidos, uno de avenidas, de diciembre a marzo y el otro de estiaje de abril a noviembre.

Los principales ríos que desembocan en el océano Pacífico, son el Chira, La Leche, Jequetepeque, Santa, Pativilca, Chancay, Rímac, Cañete, Pisco, Ica, Ocoña, Tambo y Sama.

#### **3.6.2 Vertiente del Atlántico**

La vertiente del Atlántico (Amazonas) se extiende desde los *divortium aquarum* norte de la Hoya del lago Titicaca y de la cadena occidental de la Cordillera de los Andes, fronteras con Ecuador y Colombia, hasta las fronteras con Brasil y Bolivia. Ocupa el 74,6% de la superficie del territorio nacional; en el cual se distribuye el 97,7% del volumen promedio anual de los recursos hídricos que dispone el Perú, a través del sistema fluvial Ucayali-Marañón-Amazonas, caracterizados por sus grandes caudales; siendo los más importantes los ríos Ucayali, Marañón, Putumayo, Yavari y Huallaga.

### **3.6.3 Vertiente del Titicaca**

La vertiente del Titicaca se extiende desde el divortium aquarum de la vertiente meridiana del Pacífico y Atlántico hasta la línea de frontera con Chile y Bolivia, ocupando el 3,6% del territorio nacional, en cuyo ámbito se distribuye el 0,5% del volumen promedio anual de los recursos hídricos disponibles a nivel nacional. La red hidrográfica en esta vertiente es densa y presenta procesos erosivos importantes, cuyos productos son transportados por los ríos Suches, Huancané y el Ramis, el cual forma un importante delta en su desembocadura en el lago.

## **3.7 RÉGIMEN FLUVIAL**

### **3.7.1 Año hidrológico**

Período de doce meses que comprende un ciclo hidrológico completo, partiendo del mes en que se observan los valores mínimos. En el Perú, el año hidrológico se inicia en setiembre y culmina en agosto.

### **3.7.2 Avenida fluvial**

Se denomina así al rápido aumento del nivel de agua que desciende por un curso fluvial. Aunque el término "crecida" significa el momento de máximo caudal, normalmente se considera como crecida cuando produce efectos catastróficos. Generalmente este se presenta entre los meses de diciembre y mayo.

### **3.7.3 Estiaje**

Se denomina así a la disminución de los caudales de los cursos fluviales durante las épocas secas debido a la escasez de precipitaciones. También se denomina así al nivel medio más bajo o caudal mínimo de un río u otra corriente al que se da el valor cero y constituye el punto de partida para medir la altura de las aguas. Casi todos los ríos de la vertiente del Pacífico sufren un fuerte estiaje en otoño-invierno por ello algunos de estos ríos son auténticas ramblas que tienen totalmente secos los cauces durante gran parte del año, a veces durante varios años hasta que una fuerte precipitación aporta algo de caudal. Generalmente este se presenta entre los meses de junio y noviembre.

### 3.8 ANALISIS DE SERIE DE TIEMPO

El análisis de una serie temporal tiene por objetivo verificar los supuestos básicos de toda variable hidroclimática, este análisis es una práctica habitual para poner a prueba la hipótesis de que la data observada sea homogéneo (libre de tendencia y/o saltos), estacionario (constante en el tiempo y libre de tendencia), independiente (que los datos sean aleatorios).

El análisis de una serie temporal mejorar la comprensión de la variable hidroclimática mediante mecanismos estadísticos que generan una serie de observaciones, (Kendall, G.1975), este objetivo, solo puede ser estudiado a través de una serie de mediciones.

En este contexto una serie cronológica es la representación parcial de un fenómeno complejo que en la realidad es la representación de un conjunto de series que representan diversos fenómenos asociados. Estos procedimientos pueden ser puntuales o regionales, aun así, este tipo de análisis requiere de una explicación antes de hacer cualquier tipo de interpretación que abarque dimensiones espaciales del fenómeno producido por una serie puntual. Los autores están de acuerdo con las componentes de estas perturbaciones en una serie de tiempo típica y se definen en cuatro categorías:

- Tendencia: es el componente de largo plazo que representa el crecimiento o disminución en la serie sobre un periodo amplio.
- Periodicidad: fluctuaciones regulares alrededor de la tendencia
- Autocorrelación o efecto memoria: representa la magnitud de una observación dependiente de sus observaciones previas.
- Componente irregular aleatorio

El análisis de estas componentes (supuestos básicos) son muy útiles, sin embargo esto solo puede ser afirmado tomando en cuenta hipótesis suficientemente fuertes concernientes al carácter lineal o no lineal del sistema generado que muestra una serie de tiempo.

A continuación se desarrollan algunos conceptos estadísticos para posteriormente desarrollar los test estadísticos que determinaran la tendencia, quiebre o aleatoriedad de una serie hidrológica.

**Hipótesis:** El punto de inicio de una prueba o test estadístico es definir una hipótesis nula (H0) y una hipótesis alternativa (H1). Por ejemplo un test para la tendencia.

Hipótesis nula: H0 no hay tendencia en los datos.

Hipótesis alterna: H1 hay una tendencia incremental o descendente.

**Test estadístico:** es un medio de comparación entre H0 y H1, representa un valor numérico calculado de las series de datos que están siendo testeadas.

**Nivel de significancia ( $\alpha$ ):** Al contrastar una cierta hipótesis, la máxima probabilidad con la que estamos dispuestos a correr el riesgo de cometer un error de tipo I se llama nivel de significancia. Según Kundzewicz & Robson, (2000) una posible interpretación del nivel de significancia sería:

$\alpha > 0.1$  poca evidencia contra H0

$0.05 < \alpha < 0.1$  posible evidencia contra H0

$0.01 < \alpha < 0.05$  fuerte evidencia contra H0

$\alpha < 0.01$  muy fuerte evidencia contra H0.

También es necesario definir los tipos de test paramétricos y no paramétricos:

- Los **test paramétricos** asumen que los datos y errores de una serie de tiempo siguen una distribución particular (usualmente una distribución normal) y son muy útiles para cuantificar el cambio en la media o gradiente. Los tests paramétricos son generalmente más potentes que los no paramétricos.
- Los **tests no paramétricos** detectan la tendencia y el cambio pero no cuantifican el tamaño de estas, pero son más útiles porque la mayoría de series de tiempo no son distribuidas normalmente.

### **3.8.1 Descripción de los tests estadísticos**

La literatura correspondiente a la aproximación estadística para las variables hidrometeorológicas es particularmente abundante, en este ítem se describen algunas pruebas estadísticas aplicadas a la presente investigación.

En el **Anexo I** se detallan las pruebas estadísticas implementadas en esta investigación, para el análisis de tendencia, se implementó la prueba de Mann-Kendall (Kendall, 1975), el análisis de Homogeneidad (cambios en la media) se ha implementado la prueba de *T-Student* (Gosset, 1908) y por último para el tratamiento de datos cuantitativos (atípicos) se ha implementado la prueba de Grubbs (Grubbs, 1969), los mismos que se describen detalladamente en este anexo.

### **3.8.2 Método del Vector Regional**

Acuña (2010) y Vauchel (2004) mencionan: El Método del Vector Regional (MVR) está orientado a tres tareas definidas: La crítica de datos, la homogenización y la extensión completación de datos.

La idea básica del MVR, es comparar estaciones por correlación o doble masa, como se hace en los métodos clásicos, se elabora una estación ficticia que es una “especie de promedio” de todas las estaciones de la zona, con la cual se comparan cada una de las estaciones.

El MVR se emplea entonces, para el cálculo de esta estación ficticia “Vector” el concepto de Precipitación Media Extendida al período de trabajo, salvando los problemas del peso de estaciones más lluviosas sobre las menos lluviosas (como ocurriría con un promedio simple) y la existencia de datos faltantes o diferentes períodos de funcionamiento (que calcularían promedios alterados en caso de tener solamente años húmedos o solamente años secos de determinada estación) como ocurriría al obtener valores estandarizados o centrados reducidos de lluvia. Bajo estos conceptos, se emplea el método de mínimos cuadrados para encontrar los Índices Pluviométricos Regionales Anuales “ $Z_i$ ” y la Precipitación Media Extendida “ $P_j$ ”.



$$\sum_{i=1}^m \sum_{j=1}^n \left( \frac{X_{ij}}{\bar{X}_j - Z_i} \right)^2 \quad (5)$$

Dónde:

- I : Índice de año
- J : Índice de estación
- X<sub>ij</sub> : Precipitación anual en la estación j el año i.
- X<sub>j</sub> : Precipitación media extendida al periodo de “n” años.
- Z<sub>i</sub> : Índice pluviométrico regional del año i.

El método del vector regional es un método original desarrollado en el IRD en los años 1970 por dos hidrólogos, G. Hiez y Y. Brunet-Moret, con el fin de realizar estudios de homogeneidad de las precipitaciones. Puede aplicarse también a otros tipos de datos, siempre que estos sean **independientes entre sí** y **seudo-proporcionales**. Es muy superior al método tradicional de los dobles acumulados y correlaciones entre estaciones formadas de dos en dos estaciones.

El método puesto a punto por Y. Brunet-Moret calcula mediante los mínimos cuadrados los **promedios extendidos** de cada estación durante el periodo de estudio y los **índices del vector** para cada año. Una simple prueba de diferencia con el promedio elimina del cálculo los valores erróneos.

### 3.9 ANÁLISIS DE TENDENCIAS

Tendencias son componentes determinísticos transitorios que se definen como un cambio sistemático y continuo sobre una muestra de información hidrometeorológica en cualquier parámetro de la misma, que afecta la distribución y dependencia de las series. Por ejemplo, si hay un cambio ascendente o descendente en la temperatura, precipitación, evaporación o escorrentía, entonces se produce una tendencia (estas tendencias son originadas por la intervención directa del hombre) (Villón, 2002).

#### 3.9.1 Prueba de Mann-Kendall para la detección de tendencia

La prueba de tendencia de Mann-Kendall es una prueba no paramétrica para la detección de tendencia monótona, o no estacionalidad de la tendencia central en un serie de tiempo. Es una prueba basada en los rangos de los datos por lo que es más robusto a datos extremos y atípicos en la serie de tiempo y como es no paramétrica, no está sujeto a la necesidad de asumir una distribución normal de los datos. La prueba de Mann Kendall se completa considerando cada observación como su propio dato, y las diferencias entre un punto de referencia y la observación sucesiva se calculan a través de una tabla triangular. El estadístico  $S$  es calculado como la diferencia entre el número de diferencias positivas y negativas.

$$S = P - N \quad (6)$$

Dónde:

- $S$  es el estadístico de Mann-Kendall
- $P$  es la diferencia de los rangos positivos
- $N$  es la diferencia de los rangos negativos

Para evaluar la significancia de la tendencia, cuando la muestra de datos es mayor que 10, el estadístico  $S$  se transforma para definir un  $Z$  estadístico normal estándar:

$$Z = \begin{cases} \frac{S - 1}{\sigma_s} & \text{si } S > 0 \\ 0 & \text{si } S = 0 \\ \frac{S + 1}{\sigma_s} & \text{si } S < 0 \end{cases}$$

Dónde:

- $Z$  es el estadístico que se origina a partir de  $S$
- $\sigma_s$  se define como:  $\sigma_s^2 = \frac{n(n-1)(2n+5)}{18}$

### 3.9.2 Prueba de distribución CUSUM

Este método comprueba si los medios en dos partes de un registro son diferentes (por un tiempo desconocido de cambio). Es una prueba no paramétrica (distribución libre).

Dado un tiempo de datos de series ( $x_1, x_2, x_3, \dots, x_n$ ), la estadística de prueba se define como:

$$V_{jk} = \sum_{i=1}^k \text{sgn}(x_i - x_{\text{mediana}}) \quad (7)$$

$k = 1, 2, 3, \dots, n$

Dónde:  $\text{sgn}(x) = 1$  for  $x > 0$

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

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

$x_{\text{mediana}}$  es el valor de la mediana de  $x_i$  del conjunto de datos.

La distribución de  $V_k$  sigue la de Kolmogorov-Smirnov para dos muestras Estadística (KS =  $(2/n) \max |V_k|$ ) con los valores críticos de  $\max |V_k|$  dada por:

$$\sigma = 0.10 \quad 1.22\sqrt{n}$$

$$\sigma = 0.05 \quad 1.36\sqrt{n}$$

$$\sigma = 0.01 \quad 1.63\sqrt{n}$$

Un valor negativo de  $V_k$  indica que la última parte del registro tiene una media más alta que la primera parte y viceversa.

### 3.10 PRUEBA DE NORMALIDAD

Hay diferentes maneras de probar la normalidad de una serie de tiempo. La prueba gráfica es la que más se utilizan de prueba para comprobar la hipótesis de que la serie de tiempo de interés es normal. En esta prueba, la distribución empírica de la serie se representa gráficamente en un papel de probabilidad normal.

A continuación, se comprueba si los puntos trazados se ajustan a una línea recta. La prueba de chi-cuadrado es otro método muy utilizado para probar la normalidad de los datos. Otra prueba de normalidad común es la prueba de asimetría. (M. Karamouz,A. Ahmadi,M. Akhbari, 2011).

Para tamaños de muestra menores de 150, el coeficiente de asimetría calculado se compara con los valores tabulados del coeficiente de asimetría,  $\gamma_\alpha(N)$ , presentado en la **Tabla 4**.

Si  $|\hat{\gamma}| < \gamma_\alpha(N)$ , se acepta la hipótesis de normalidad.

**Tabla 4: Valores críticos del coeficiente de asimetría de test de normalidad.**

N	Nivel de Significancia, $\alpha$	
	$\alpha = 0.02$	$\alpha = 0.01$
25	1.061	0.711
30	0.986	0.662
35	0.923	0.621
40	0.87	0.587
45	0.825	0.558
50	0.787	0.534
100	0.567	0.389
125	0.508	0.35
150	0.464	0.321

FUENTE: Snedecor and Cochran (1967)

### 3.11 SEQUÍA EN EL PERÚ

La sequía, junto al Fenómeno de El Niño, es uno de los shocks covariados que produce mayores estragos en la agricultura peruana. Si hacemos un análisis de estos dos eventos climáticos en las últimas seis décadas, tenemos que se han presentado en total once fenómenos de El Niño, y seis sequías, ambos de diferentes intensidades, tal como puede verse en la **Tabla 5**. (Carolina Trivelli, IEP y Steve Boucher, UC Davis, 2005).

**Tabla 5: Eventos climáticos en el Perú, 1950 – 1998.**

Campaña	Evento	Intensidad
52/53	Niño	Poco severo
57/58	Niño	Poco severo
58/59	Niño	Débil
64/65	Niño	Débil
67/68	Sequía	Débil
68/69	Sequía	Débil
69/70	Sequía	Débil
71/72	Niño	Poco severo
72/73	Niño	Débil
75/76	Niño	Débil
77/78	Sequía	Débil
78/79	Sequía	Débil
82/83	Niño	Muy Severo
86/87	Niño	Poco severo
89/90	Sequía	Débil
91/92	Niño	Débil
97/98	Niño	Severo

FUENTE: Primer compendio estadístico agrario 50/91 y Perú en Números 2004.

Elaboración: IEP

### **3.12 EL NIÑO OSCILACIÓN DEL SUR (ENOS)**

El Niño Oscilación del Sur (ENOS) es el primer modo de variabilidad climática al paso de tiempo interanual, principalmente en los trópicos (Ropelewski & Halpert, 1987). El ENOS consiste en un calentamiento de las aguas del Pacífico y que tiene una gran influencia en el comportamiento del clima en diversos lugares del mundo.

En condiciones normales, una masa superficial de agua cálida se extiende en el extremo oeste del océano Pacífico tropical mientras que cerca de las costas de Ecuador y norte de Perú el agua superficial es más fría. Esta distribución del agua está ocasionada porque los vientos alisios (dominantes en esta zona del océano) van de este a oeste y arrastran al agua superficial cálida hacia el oeste. Este desplazamiento del agua superficial hace posible que agua profunda y fría salga a la superficie junto a las costas de América del Sur (corriente de Humboldt). Esta corriente arrastra nutrientes del fondo, crecen las poblaciones de peces y se forman las buenas pesquerías propias de la zona. Pero cada cierto tiempo (entre 4 a 8 años) el régimen de los vientos alisios se debilita, a la vez que la masa de agua se calienta unos 3 a 7°C más que lo normal. Las anomalías de temperatura sobre la superficie del Pacífico ecuatorial se hacen más extensas y se trasladan hacia el este del Pacífico hasta llegar a tocar en ocasiones la costa de Ecuador y Perú. Este fenómeno que involucra cambios en el océano y en la atmósfera, es conocido como El Niño, mientras que anomalías contrarias a las descritas anteriormente dan lugar a los eventos La Niña.

Los impactos del ENOS han sido ligados con anomalías hidroclimáticas alrededor del mundo. Un completo análisis realizado por Chiew & McMahon (2002) indica una clara relación ENOS-caudales. Significativo y regionalmente consistente teleconexiones entre el ENOS y caudales son identificados en Australia y Nueva Zelandia, Sur y Centroamérica, y señales medianamente significativas son identificados en algunas partes de África y América del Norte.

Estudios de los impactos del ENOS en caudales sobre territorio peruano están documentados principalmente en los ríos de la costa norte del Pacífico peruano, donde sus impactos más fuertes han sido registrados durante los años 1982-1983 y 1997-1998 (OPS, 2000). Durante estos años los ríos del norte del Perú presentan grandes avenidas (Waylen & Caviedes, 1986; Waylen & Poveda, 2002). La cordillera blanca con gran aporte glaciar en los caudales de la cuenca del río Santa (localizada en la costa central del Pacífico peruano) presenta balances

de masas glaciares (BMG) caracterizados por los eventos ENOS (Vuille et al., 2008). Así, se tienen negativos BMG durante la fase cálida del ENOS (El Niño) y valores sobre la media de BMG durante la fase fría (La Niña). Sin embargo, la relación entre ENOS y BMG es caracterizado por ocasionales “quiebres de caídas” sobre todo desde comienzo de los años 1970, donde El Niño es asociado con valores sobre la media de BMG y La Niña con negativos valores de BMG.

Recientemente Espinoza et al. (2009) realizó un estudio de caudales sobre la cuenca amazónica, utilizando algunas estaciones localizadas en territorio peruano, encontrando que el primer modo de variabilidad de caudales (resultante de un análisis en componente principales es relacionado con más (menos) caudal durante los eventos La Niña (El Niño).

Los eventos ENOS que tuvieron mayor impacto en la economía peruana, como consecuencia de los desastres que causaron las grandes avenidas, fueron los de 1982-1983 y 1997-1998. Así, de acuerdo a la OPS(2000) las pérdidas directas causadas por ENOS durante el evento extremo 1997-1998 se estimaron en US\$ 1.000 millones, de los cuales 800 corresponden al norte, como consecuencia de las lluvias excesivas, y 200 millones a la Sierra sur, por efectos de la sequía. El impacto económico de este desastre se reflejó en la disminución significativa del producto bruto interno (PBI) del Perú, que descendió hasta en un 12% y que, relacionado con el incremento de la población, originó una notable caída del PBI per cápita del 14,3%.

### **3.12.1 Índice Oceánico El Niño (ONI)**

La Administración Nacional para el Océano y la Atmósfera de los Estados Unidos de Norteamérica (NOAA), utiliza el Índice Oceánico El Niño (ONI, por sus siglas en inglés) para la identificación de El Niño y La Niña. Este índice se calcula promediando 3 meses consecutivos la serie mensual de las anomalías de la temperatura superficial del mar medidas en el Pacífico tropical en la Región El Niño 3.4 (5°N - 5°S, 120° - 170°W). Se consideran episodios cálidos y fríos cuando el índice ONI supera el umbral de +/- 0.5 °C. Cuando dicho umbral es cubierto durante un mínimo de 5 meses continuos, se definen como episodios El Niño (+) o de La Niña (-) (**Tabla 6**). Los episodios históricos ENOS se clasifican en dos fases, fase cálida del ENOS corresponde a El Niño (calentamiento oceánico), mientras que la fase fría del ENOS, corresponde a La Niña (enfriamiento oceánico) (**Tabla 7**).

**Tabla 6: Clasificación del Índice Oceánico El Niño (ONI).**

<b>Categoría</b>	<b>Índice Oceánico El Niño (ONI)</b>
Cálido fuerte	Mayor o igual a +1.4
Cálido moderado	Mayor que +0.9 y menor que +1.4
Cálido débil	Mayor que +0.5 y menor que +1.0
Neutro	Mayor que -0.5 y menor que +0.5
Frio débil	Menor que -0.5 y menor que -0.9
Frio moderado	Menor que -1.0 y menor que -1.5
Frio fuerte	Menor o igual que -1.5

FUENTE: NOAA

**Tabla 7: Episodios históricos El Niño y La Niña basado en el ONI.**

<b>El Niño</b>	<b>Valor más alto ONI</b>	<b>La Niña</b>	<b>Valor más bajo ONI</b>
JJA 1951 – DJF 1951/52	1.2	ASO 1949 – JAS 1950	-1.4
DJF 1952/53 – JFM 1954	0.8	SON 1950 – JFM 1951	-0.8
MAM 1957 – JJA 1958	1.8	AMJ 1954 – NDJ 1956/57	-1.7
OND 1958 – FMA 1959	0.6	AMJ 1964 – DJF 1964/65	-0.8
MJJ 1963 – JFM 1964	1.4	JJA 1970 – DJF 1971/72	-1.3
AMJ 1965 – MAM 1966	1.9	AMJ 1973 – JJA 1974	-2.0
JAS 1968 – DJF 1969/70	1.1	SON 1974 – MAM 1976	-1.7
AMJ 1972 – FMA 1973	2.1	ASO 1983 – DJF 1983/84	-0.9
ASO 1976 - JFM 1977	0.8	SON 1984 – ASO 1985	-1.1
ASO 1977 – JFM 1978	0.8	AMJ 1988 – AMJ 1989	-1.9
AMJ 1982 – MJJ 1983	2.2	ASO 1995 – FMA 1996	-0.9
JAS 1986 – JFM 1988	1.6	JJA 1998 – FMA 2001	-1.7
AMJ 1991 – MJJ 1992	1.6	OND 2005 – FMA 2006	-0.9
ASO 1994 – FMA 1995	1.2	JAS 2007 – MJJ 2008	-1.5
AMJ 1997 – MAM 1998	2.4	OND 2008 – FMA 2009	-0.8
AMJ 2002 – JFM 2003	1.3	JJA 2010 – MAM 2011	-1.5
JJA 2004 – DJF 2004/05	0.7	ASO 2011 – FMA 2012	-1.0
ASO 2006 – DJF 2006/07	1.0		
JJA 2009 – MAM 2010	1.6		

FUENTE: NOAA



## **IV. MATERIALES Y METODOLOGÍA**

Para el desarrollo de la presente investigación, se emplearon los siguientes materiales y/o datos: se desarrolló una metodología para la caracterización de la sequía bajo un índice basándose en la información hidrométrica.

### **4.1 ÁREA DE ESTUDIO**

#### **4.1.1 Ubicación geográfica y política**

La zona de estudio geográficamente abarca gran área del territorio peruano, considerando en el análisis 12 cuencas hidrográficas del Pacífico, 3 cuencas hidrográficas del Titicaca y 7 cuencas hidrográficas del Amazonas.

La Vertiente peruana del Pacífico, geográficamente está comprendida entre los paralelos 3° 22' 38" y 18° 21' 03" Latitud sur y meridianos 70° 02' 02" y 81° 19' 34.5" Longitud oeste, cubre una gran extensión que representa el 21.7% del área total del país, está constituida por 62 cuencas principales (unidades hidrográficas), de las cuales analizaremos 12 unidades hidrográficas, estas se mencionan a continuación de sur a norte: Camaná, Pisco, San Juan, Cañete, Mala, Rímac, Chancay-Huaral, Chancay-Lambayeque, La Leche, Piura, Chira y Tumbes (estas 02 últimas binacionales).

La Vertiente peruana del Amazonas, geográficamente está comprendida entre los paralelos 0° 3' 15.5" y 14° 27' 55.23" Latitud sur y meridianos 69° 56' 1.39" y 70° 02' 02" Longitud oeste, cubre una gran extensión que representa el 74.5% del área total del país, está constituida por 84 cuencas principales (unidades hidrográficas), de las cuales analizaremos 7 unidades hidrográficas, estas se mencionan a continuación de sur a norte: Vilcanota, Ucayali, Huallaga, Mayo, Alto Marañón, Bajo Marañón y Amazonas.

La Vertiente peruana del Titicaca, geográficamente está comprendida entre los paralelos 13° 47' 54.3" y 17° 16' 46.34" Latitud sur y meridianos 70° 02' 02" y 70° 54' 2.32" Longitud oeste, cubre una gran extensión que representa el 3.8% del área total del país,

está constituida por 13 cuencas principales (unidades hidrográficas), de las cuales analizaremos 3 unidades hidrográficas, estas se mencionan a continuación de sur a norte: Ilave, Ramis y Huancané.

En la **Tabla 8** se observa las Unidades Hidrográficas que conforman parte del territorio peruano, la Vertiente peruana del Pacífico (VP) está conformada por 62 cuencas y 65 intercuencas cubriendo el 21.7% del territorio peruano, mientras que la región Hidrográfica del Amazonas está conformado por 84 cuencas y 45 intercuencas, cubriendo la mayor parte del territorio peruano con 74.5% del área total, mientras que la región Hidrográfica del Titicaca está conformado por 13 cuencas, 5 intercuencas y el lago del Titicaca, cubriendo el 3.8% del territorio peruano.

**Tabla 8: Unidades Hidrográficas del Perú.**

<b>Región Hidrográfica</b>	<b>Superficie</b>		<b>Unidades Hidrográficas</b>		
	<b>(Km2)</b>	<b>(%)</b>	<b>Cuencas</b>	<b>Intercuenca</b>	<b>Lagos</b>
Pacífico	278 482.44	21.7	62	65	----
Amazonas	957 822.52	74.5	84	45	----
Titicaca	48 910.64	3.8	13	5	1
<b>Total</b>	<b>1 285 215.60</b>	<b>100.0</b>	<b>159</b>	<b>70</b>	<b>1</b>

FUENTE: ANA y MINAGRI (2010)

## 4.2 MATERIALES

### 4.2.1 Información hidrológica

#### 4.2.1.1 Caudales

El trabajo de investigación se desarrolló en base a la información hidrológica de veintidós series de caudales promedios mensuales en metros cúbicos por segundo ( $m^3/s$ ), proveniente de las estaciones hidrométricas del *SENAMHI*<sup>2</sup>. Para fines del análisis de sequías se utilizó series promedios mensuales, continuos y completas para el periodo del año 1973 al 2013. A partir de estas series históricas de caudales mensuales se calcularan una serie de estados de sequía.

Los caudales de las estaciones hidrométricas amazónicas fueron adquiridos con apoyo fundamental de las campañas de aforo realizadas por el proyecto peruano-francés HYBAM (Convenio SENAMHI-IRD). Para eso, el proyecto utilizó la red hidrológica del SENAMHI en esta región, que tiene unas quince estaciones a la largo de los ríos Ucayali, Huallaga, Marañón, Nanay, Napo y Amazonas. En estas estaciones donde el SENAMHI efectúa control de los niveles de agua desde unos treinta años, se realiza aforos regulares con tecnología Doppler (ADCP) a fin de establecer curvas de calibración “nivel-caudal” necesarias para el cálculo de los caudales diarios (Yerren, 2003).

Espacialmente estas estaciones de caudales se observan en la **Figura 5**. En resumen, las 12 unidades hidrográficas vierten sus aguas hacia el océano Pacífico; 7 unidades hidrográficas vierten sus aguas hacia el Amazonas y 3 unidades hidrográficas vierten sus aguas hacia el Lago Titicaca.

En la **Tabla 8**, describe las estaciones hidrométricas analizadas. Donde, Ver es vertiente hidrográfica, donde P es Pacífico, LT es Lago Titicaca y A es Amazonas; Cod. es el código de la estación; Lat es latitud y Lon es longitud en SO respectivamente; El es elevación en m.s.n.m.; El área en  $Km^2$  y Q es caudal en  $m^3/s/año$ .

---

<sup>2</sup> Servicio Nacional de Meteorología e Hidrología

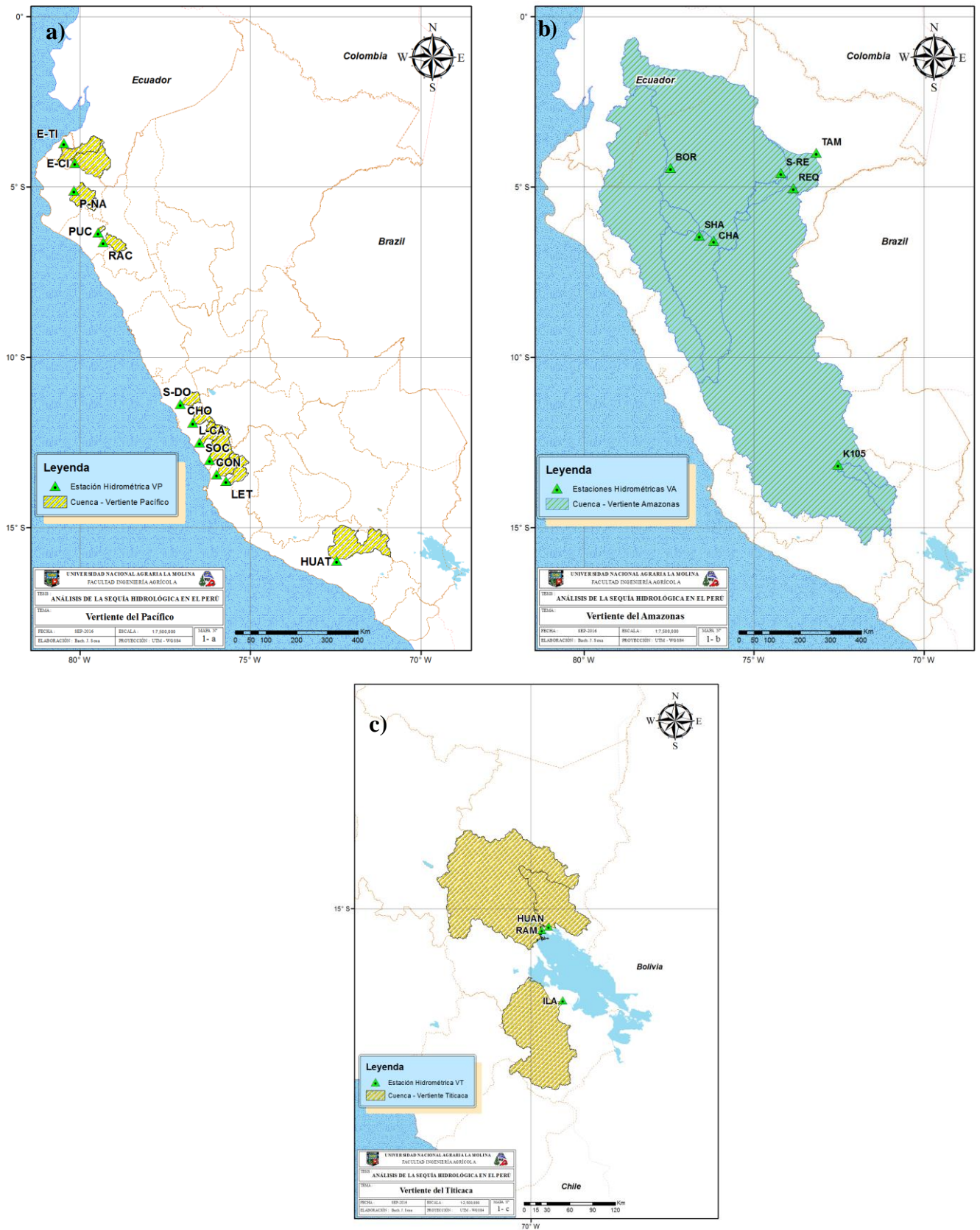
**Tabla 8: Detalles de las estaciones hidrométricas.**

<b>Id</b>	<b>Nombre estación</b>	<b>Cod.</b>	<b>Ver.</b>	<b>Cuenca</b>	<b>Lat</b>	<b>Lon</b>	<b>El</b>	<b>Periodo</b>	<b>Área</b>	<b>Q</b>
1	El Tigre	E-TI	VP	Tumbes	-3.76	-80.45	40	1973-2013	4768	113.98
2	El Ciruelo	E-CI	VP	Chira	-4.29	-80.16	250	1973-2013	7693	115.72
3	Pte. Ñacara	P-ÑA	VP	Piura	-5.11	-80.17	119	1973-2013	4721	29.69
4	Puchaca	PUC	VP	La leche	-6.37	-79.47	330	1973-2013	322	6.59
5	Racarumi	RAC	VP	Chancay-Lambayeque	-6.63	-79.31	250	1973-2013	2371	34.37
6	Sto. Domingo	S-DO	VP	Chancay-Huaral	-11.37	-77.02	697	1973-2013	1831	17.32
7	Chosica	CHO	VP	Rímac	-11.93	-76.69	906	1973-2013	2281	31.81
8	La capilla	L-CA	VP	Mala	-12.52	-76.49	424	1973-2013	2088	15.76
9	Socsi	SOC	VP	Cañete	-13.02	-76.19	330	1973-2013	5825	52.31
10	Conta	CON	VP	San Juan	-13.45	-75.98	350	1973-2013	3050	9.98
11	Letrayoc	LET	VP	Pisco	-13.65	-75.71	720	1973-2013	3013	21.76
12	Huatiapa	HUAT	VP	Camaná	-15.99	-72.47	699	1973-2013	13102	85.24
13	Pte. Ilave	ILA	VT	Ilave	-16.08	-69.62	3850	1973-2013	8384	37.16
14	Pte. Huancané	HUAN	VT	Huancané	-15.21	-69.79	3860	1973-2013	3682	19.23
15	Pte. Ramis	RAM	VT	Ramis	-15.25	-69.87	3850	1973-2013	15622	75.30
16	Km-105	K105	VA	Vilcanota	-13.17	-72.52	1795	1973-2013	9601	124.15
17	Shanao	SHA	VA	Mayo	-6.43	-76.60	300	1973-2013	8448	409.79
18	Borja	BOR	VA	Alto marañón	-4.45	-77.45	450	1973-2013	114232	4785.3
19	Chazuta	CHA	VA	Huallaga	-6.58	-76.18	200	1973-2013	68435	3318.4
20	San Regis	S-RE	VA	Bajo marañón	-4.60	-74.20	80	1973-2013	356274	17902
21	Requena	REQ	VA	Ucayali	-5.04	-73.83	200	1973-2013	346049	14350
22	Tamshiyacu	TAM	VA	Amazonas	-4.00	-73.16	105	1973-2013	721521	31522

FUENTE: Elaboración propia (2015)

La **Tabla 8** muestra la red de estaciones hidrométricas analizadas, ellas se encuentran en condiciones operativas con un registro lo suficientemente largo para el análisis en la presente investigación.

La **Figura 5**, Muestra la distribución espacial de las estaciones hidrométricas, la demarcación coloreada especifica las unidades hidrográficas (UH) evaluadas, la costa peruana está conformada por 62 unidades hidrográficas, de las cuales 12 son evaluadas en la presente investigación; de la región hidrográfica Amazónica peruana está conformada por 84 unidades hidrográficas, de las cuales 7 son evaluadas en la presente investigación y de la región hidrográfica del Titicaca está conformada por 13 unidades hidrográficas, de las cuales 3 son evaluadas en la presente investigación.



**Figura 5:** a) Estaciones localizadas en la vertiente del Pacífico, b) Estaciones localizadas en la vertiente del Amazonas y c) Estaciones localizadas en la vertiente del Titicaca.

FUENTE: Elaboración Propia (2015)

#### **4.2.2 Información cartográfica**

- Modelo de elevación digital del terreno (DEM), resolución de 90m x 90m.

#### **4.2.3 Información climática**

- Índice Oceánico El Niño (ONI), años (1973-2013).

#### **4.2.4 Equipos y software**

##### **a) Equipos de gabinete**

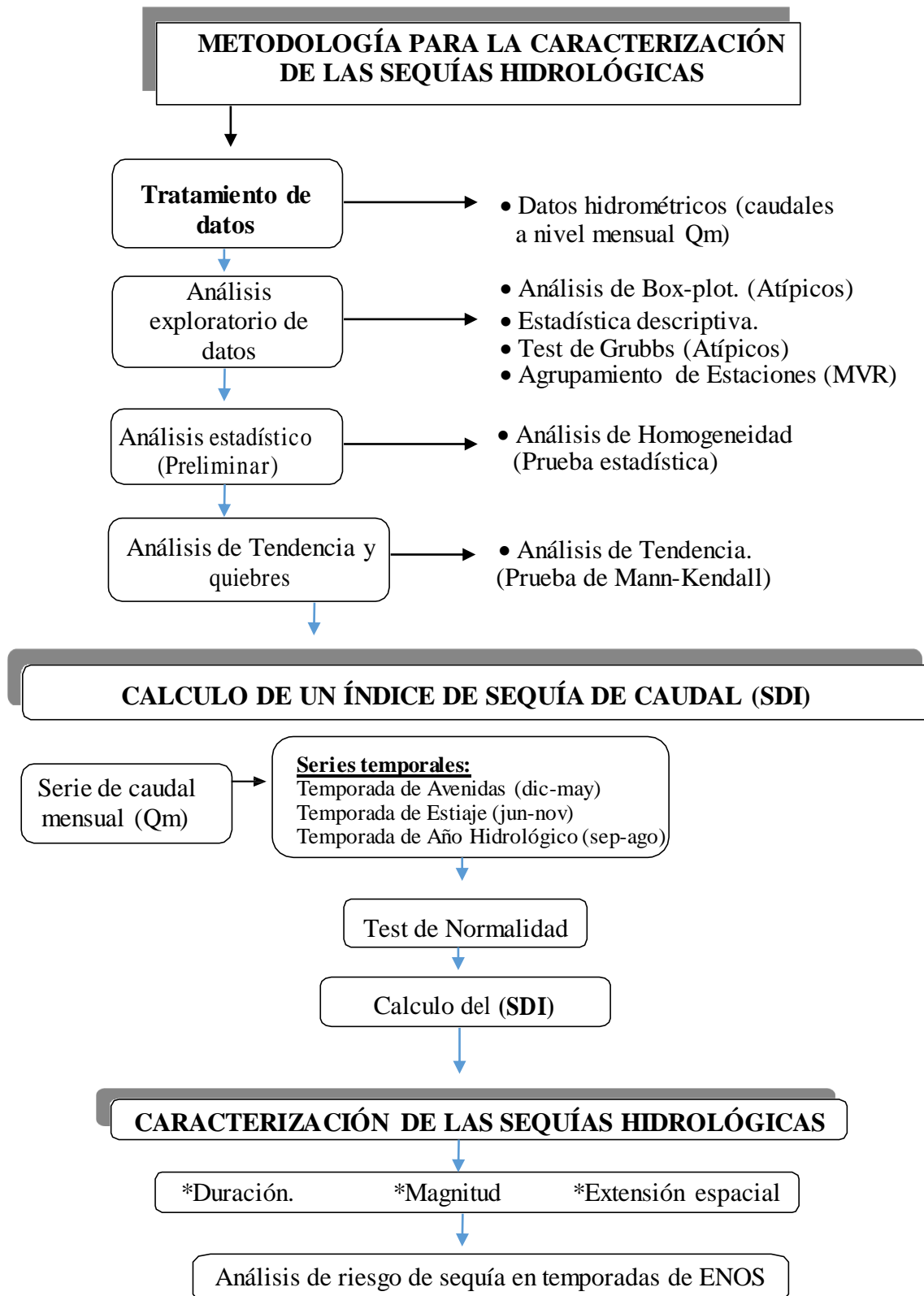
- Laptop Toshiba Satellite A660 (1)
- Impresora HP PSC 1310 (1)

##### **b) Programas de cómputo y materiales:**

- Microsoft office 2013.
- ArcGIS 10.2.2.
- Hydraces.
- TREND.
- Minitab.
- AMEVA.
- Materiales de escritorio.

### 4.3 METODOLOGÍA

El procedimiento metodológico desarrollado posee la siguiente secuencia:



**Figura 6: Proceso metodológico de la caracterización de sequía hidrológica.**

FUENTE: Elaboración Propia (2015)

### **4.3.1 Información hidrométrica**

La información para el presente estudio fueron obtenidos de diferentes fuentes como la central de información de recursos hídricos del portal web de la Autoridad Nacional del Agua (ANA), y de un compendio elaborado entre el ANA y el Ministerio de Agricultura (MINAGRI) el cual es titulada como: *Recursos hídricos del Perú – 2010*, este material nos proporciona datos de caudal a nivel mensual de las principales cuencas, de las que se seleccionó las estaciones hidrométricas más representativas de las tres vertientes hidrográficas del Perú, estas son administradas por el Servicio Nacional de Meteorología e Hidrología del Perú (SENAMHI).

El criterio de selección constó mediante el análisis visual de la serie de caudales mensuales a través de una línea de tiempo, además se consideró un periodo óptimo de las series de caudales medio mensuales de un periodo mayor a 20 años, continuos y completos.

### **4.3.2 Análisis exploratorio de datos**

Se realiza el análisis exploratorio de datos (AED) de la información hidrológica, mediante una descripción estacional multianual de los caudales medios mensuales. Este análisis nos ayuda a detectar posibles errores o inconsistencia en los datos de partida, en él se ha elaborado el diagrama de cajas (*Box-plot*) para tener una primera aproximación del comportamiento hídrico de las estaciones analizadas (calidad de datos).

El AED realiza una visión general de todos los datos a ser analizados, detectando posibles datos atípicos (outliers) dentro de la muestra, estos datos (outliers), serán contrastado conociendo su fecha de ocurrencia y el evento que los produjo, realizando una comparación con las estaciones hidrométricas vecinas; es aquí donde se pone en juico la posible presencia de valores atípicos, en base a este análisis se considera su posible eliminación o inclusión en las siguientes etapas del análisis para no alterar la muestra.

Como segundo análisis que ayude a confirmar estos posibles valores atípicos, se evaluó la prueba estadística de Grubbs, el cual posee unos estadísticos en base la data estandarizada y a su longitud de registro, definiendo un nivel de truncamiento, cuyo resultado identifica los valores atípicos presentes para un nivel de significancia de 99%.



Para prueba de Grubbs se contrastando las hipótesis a un nivel de significancia de 99%.

Hipótesis nula (H0): No hay valores atípicos en los datos

Hipótesis alterna (H1): El valor mínimo o máximo es un valor atípico

La gráfica de *Box-plot* se realizó mediante la utilización de *software* como Minitab o AMEVA, programas estadísticos diseñados para el tratamiento de datos, cálculos y desarrollo de gráficos, muy difundido en la comunidad científica.

#### **4.3.3 Análisis estadístico preliminar**

La prueba denominado *análisis estadístico (preliminar)* identifica cambio en la media o la no homogeneidad de los datos analizados mediante la prueba de *T-Student*, cambio abruptos en los valores medio anuales de una serie de caudales suelen estar asociados a cambios en los procesos de observación, emplazamiento de la estación hidrométrica (avenidas) y alteraciones antrópicas (trasvase o represamiento) en el cauce.

Este tipo de cambios en la media conocidos como *saltos* son fácilmente detectables mediante los test no paramétricos, el uso de esta prueba estadística permitió visualizar los cambios en la media y la fecha en la cual se producido este cambio para el análisis posteriores (completación de datos).

#### **4.3.4 Análisis de tendencia**

El análisis de toda variable hidroclimática, evalúa los estadísticos, que son supuestos básicos que nos ayuda a aumentar la confiabilidad de los datos analizados, poniendo a prueba hipótesis con respecto a la data observada: homogéneo (libre de tendencia y saltos) y/o estacionario (constante en el tiempo y libre de tendencia).

En el presente estudio se realizó el análisis de tendencia en base a la información histórica de los caudales específicos de cada río mediante el uso del *software TREND*, la cual facilita test estadísticos de tendencias, cambio y aleatoriedad en series hidrológicas y otras series de tiempo.

Se aplica el test *CUSUM* para la detección de cambio en la media en las series de datos utilizados. El test de *Mann-Kendall* es usado para la detección de la tendencia a un nivel de significancia de 5% en la serie de datos utilizados.

#### 4.3.4 Aplicación del SDI

Para el desarrollo de los índices de sequía de caudales (SDI), la forma más sencilla de simular dichas condiciones involucra el uso del método propuesto recientemente por Nalbantis y Tsakiris (2008).

Esta metodología se aplica a la variable caudal mensual en cada una de las estaciones seleccionadas del ámbito de estudio, que permita identificar y caracterizar los eventos de sequía hidrológica ocurridas (1973 – 2013).

A partir de la serie histórica de caudales, se calcula una serie de SDI que produce una serie de estados de sequía. El proceso de estado subyacente se supone que poseen estructuras de una cadena de Markov no estacionario. Cadenas de Markov se han aplicado ampliamente para predecir sequías (los principalmente meteorológicos) (Lohani y Loganathan, 1997; Lohani et al., 1998; Ochola y Kerkides, 2003; Paulo y Pereira, 2006).

Si  $Q_{i,j}$  ( $i = 1, 2, \dots, N$ ;  $j = 1, 2, \dots, 12$ ) es la serie de tiempo observada de los volúmenes de caudales mensuales para la cuenca en estudio, donde  $N$  es el número de años hidrológicos.

Antes de someter las series de caudales mensuales a la caracterización del SDI, se debe de ajustar cada serie a una distribución logarítmica normal de dos parámetros, para esta transformación basta en tomar logaritmos naturales de los caudales acumulados de acuerdo a periodo de referencia considerado.

Para la caracterización del SDI se propone considerar determinar la frecuencia, duración y el volumen que representa por cada categoría de sequía.

En primer lugar, el acumulado volúmenes de caudal  $V_{i,k}$  ( $i = 1, 2, \dots, N$ ;  $k = 1, 2, 3, 4$ ) se calculan a través de la ecuación 1. En segundo lugar, las series  $SDI_{i,k}$  del índice SDI es calculada de la ecuación 2 o 3 en tercer lugar, la serie de estados  $x_{i,k}$  ( $i=1, 2, \dots, N$ ;  $k=1, 2, 3, 4$ ) se obtiene de acuerdo con los criterios de la **Tabla 3**. Para cada  $k$ , el proceso de estado relacionada  $X_{i,k}$  toma valores discretos de  $m \in [0, 1, 2, 3, 4]$ . En cuarto lugar, la frecuencia de aparición de cada estado  $m$  en cada período de referencia  $k$ ,  $F_{m,k}$ , se estima como:

$$F_{m,k} = \frac{n_{m,k}}{N} \quad (8)$$

Para el análisis de sequía de esta investigación se propone analizar las temporadas de avenidas y de estiaje de la siguiente manera, un  $k = 2$  para un SDI-6 correspondiente a los meses de caudales acumulados de diciembre a mayo y a los meses de los caudales acumulados de junio a noviembre respectivamente. Para el análisis de sequía para el año hidrológico se considera un  $k = 4$  para un SDI-12 correspondiente a los meses de los caudales acumulados de septiembre a agosto.

Donde  $n_{m,k}$  es el número de ocurrencias de estado  $m$  en período de referencia  $k$  en la muestra disponible de  $N$  años. Esta es una estimación de la probabilidad pm marginal,  $k$  de aparición de estado  $m$  en período de referencia  $k$ , i.e.

$$P_{m,k} = P(X_{i,k} = m) \quad m \in [0, 1, 2, 3, 4] \quad \forall i \quad (9)$$

Donde  $P(\cdot)$  denota la probabilidad. Para cada  $k$ , probabilidades  $p_{m,k}$  ( $m = 0, 1, 2, 3, 4$ ) para una columna vector  $p_k$   $5 \times 1$ .

En quinto lugar, la frecuencia de transición de estado  $F_{m,m',k}$  de un estado en el período de referencia  $k$  para el estado  $m'$  en período de referencia  $k+1$  es:

$$F_{m,m',k} = \frac{n_{m,m',k}}{\sum_{m'} n_{m,m',k}} \quad (10)$$

Donde  $n_{m,m',k}$  es el número de ocurrencias de estado  $m$  en referencia periodo  $k$  y el estado  $m'$  en período de referencia  $k+1$ . Esta es una estimación de la probabilidad de transición  $p_{m,m',k}$  que se define como

$$P_{m,m',k} = P(X_{i,k} = m' \mid X_{i,k} = m) \quad m \in [0, 1, 2, 3, 4] \quad m' \in [0, 1, 2, 3, 4] \quad \forall i \quad (8)$$

Donde  $P(\cdot|\cdot)$  denota la probabilidad condicional. Para cada  $k$ , las probabilidades de transición forman una matriz de  $5 \times 5$  denota como  $P_k$ .

Supongamos ahora que el intervalo de tiempo actual es  $(i,k)$ . Antes de caracterizar el estado actual sequía, se puede predecir las probabilidades marginales para el próximo período de referencia  $k+1$  como

$$p_{k+1} = P_k p_k \quad (11)$$

Dentro de un contexto operacional, al final del intervalo de tiempo  $(i,k)$ , se supone que todos los datos históricos hasta ese momento están disponibles. Esto permite clasificar el intervalo actual. Por lo tanto, vector  $p^k$  de la ecuación 11 tiene ahora un elemento igual a uno y todos los demás elementos cero. Se deduce de la ecuación 11 que la única información necesaria para la predicción de la sequía es la matriz  $P^k$  como esta se aproxima por su estimación, la matriz de la frecuencia de transición de estado. Este es el principal resultado de la metodología cuando se trabaja fuera de línea en la serie histórica. En situaciones en tiempo real, la salida es (a) un único valor de estado actual y (b) las probabilidades de los estados futuros como los obtenidos a partir de una matriz almacenada de la probabilidad de transición de estado.

### 4.3.5 Caracterización de las sequías

La caracterización de las sequías hidrológicas sobre la zona de estudio es muy variada, para definir los eventos de sequías ocurridos en diferentes cuencas a lo largo del territorio peruano entre los años de 1973 al 2013, se desarrolló un Índice de Sequía de Caudal (SDI), su cuantificación se evaluó mediante el método de umbrales invariables en tiempo y espacio propuesto por Nalbantis y Tsakiris (2008).

La selección de cinco estados de sequía hidrológica indicados por un número entero que van de 0 (no sequía) a 4 (sequía extrema) se definen a través de los criterios descritos en la Tabla 3. Asimismo, la selección los umbrales, donde se utilizó un promedio de 34.1% de probabilidad para definir eventos de sequía leve correspondiente a un valor de 0, y de 9.2% de probabilidad para definir los eventos de sequía moderada con un valor del SDI de -1, y de 4.4% de probabilidad para definir los eventos de sequía severa con un valor del SDI de -1.5, y finalmente 2.3% para definir eventos de sequía extrema con un valor del SDI de -2.

Las sequías hidrológicas se diferencian unas de otras en tres características principales como son: la duración, intensidad (magnitud) y extensión espacial, estas tres características en conjunto nos ayudan a determinar los impactos negativos que producen en los recursos hídricos superficiales (ríos y embalses) y subterráneos (pozos), permitiendo estimar la vulnerabilidad del recurso hídrico ante la ocurrencia de eventos secos.

#### 4.3.5.1 Principales características de las sequías hidrológicas

##### a) Duración

La duración es el número de eventos temporales consecutivos con un caudal inferior al nivel de truncamiento, pudiendo ser meses o años consecutivos.

El nivel de truncamiento ha sido definido en:

Sequía leve (34.1% de la probabilidad) entre  $-1.0 \leq \text{SDI} < 0.0$

Sequía moderada (9.2% de la probabilidad) entre  $-1.5 \leq \text{SDI} < -1.0$

Sequía severa (4.4% de la probabilidad) entre  $-2.0 \leq \text{SDI} < -1.5$

Sequía extrema (2.3% de la probabilidad) inferior a  $\text{SDI} < -2$

## b) Intensidad y Magnitud

La intensidad se determina en función del Índice de Sequía de Caudal (SDI), corresponde al valor máximo en un evento seco, esta investigación considera cuatro tipos de evento de sequía según el nivel de truncamiento:

El evento que sobrepasa el nivel de truncamiento de 0 en la escala del SDI es:

$$\textit{Sequía leve} \quad -1.0 \leq \text{SDI} < -0.0$$

El evento que sobrepasa el nivel de truncamiento de -1.0 en la escala del SDI es:

$$\textit{Sequía moderada} \quad -1.5 \leq \text{SDI} < -1.0$$

El evento que sobrepasa el nivel de truncamiento de -1.5 en la escala del SDI es:

$$\textit{Sequía severa} \quad -2.0 \leq \text{SDI} < -1.5$$

El evento que sobrepasa el nivel de truncamiento de -2.0 en la escala del SDI es:

$$\textit{Sequía extrema} \quad \text{SDI} < -2.0$$

La intensidad de la sequía puede ser cuantificada de dos formas: intensidad máxima y la intensidad promedio.

**Intensidad Máxima.** Es la mayor diferencia entre el nivel de truncamiento y los eventos producidos, también definido como el déficit máximo, se caracteriza por su máxima desviación con respecto al umbral de truncamiento.

$$I_{max} = \max(U - Xi) \quad (12)$$

Dónde:

$U$  = umbral de truncamiento definido

$Xi$  = evento máximo producido (índice de sequía de caudal SDI)

**Intensidad Promedio.** Es el déficit promedio producido durante un evento de sequía, se define como la relación entre la sumatoria de déficit a partir del nivel de truncamiento y la duración de este evento, otro término es la relación de la magnitud entre la duración.

$$I_{prom} = \frac{\sum(U - Xi)}{D} \quad (13)$$

Dónde:

$U$  = umbral de truncamiento definido

$X_i$  = evento máximo producido (índice de sequía de caudal SDI)

$D$  = duración temporal de un evento de sequía

La magnitud es la sumatoria de los valores deficitarios del SDI durante un evento de sequía a partir de un nivel de truncamiento.

$$Magnitud = \sum(U - X_i) \quad (14)$$

Dónde:

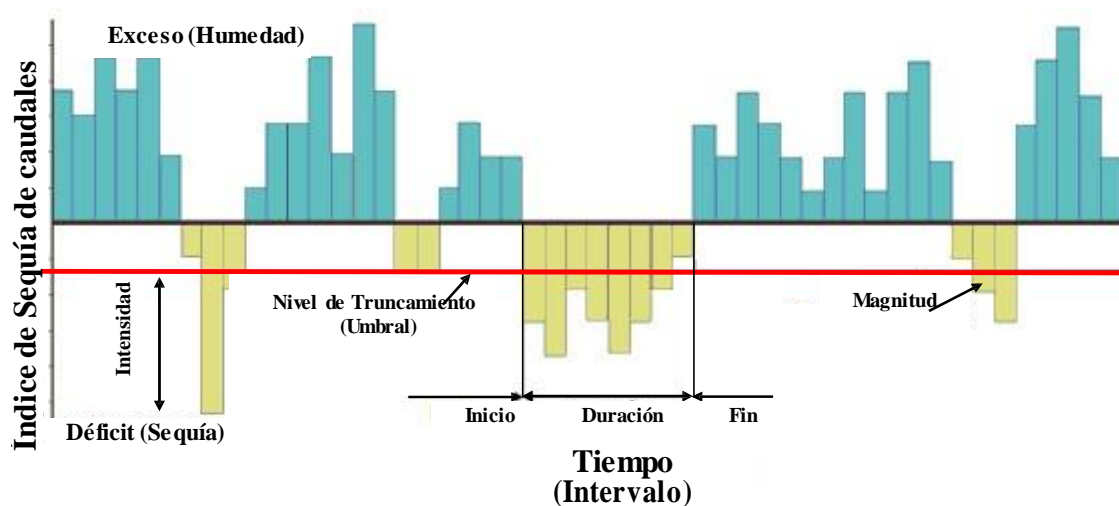
$U$  = umbral de truncamiento definido

$X_i$  = evento máximo producido (índice de sequía de caudal SDI)

El cálculo de la duración, intensidad y magnitud de un evento seco, se realiza en una serie cronológica de un índice de sequía de caudal (SDI) a nivel mensual.

La sequía comienza cuando la intensidad es inferior al nivel de truncamiento de 0 (sequía leve) y termina cuando la intensidad supera el valor de truncamiento (-1).

En la **Figura 7**, se muestra un ejemplo del esquema de la serie cronológica de oferta - demanda para la identificación y caracterización de la duración, intensidad y magnitud de la sequía bajo un nivel de truncamiento definido.



**Figura 7: Esquema de la serie cronológica de oferta - demanda.**

FUENTE: Elaboración Propia (2015)

En el ejemplo de la **Figura 7**, se esquematiza un evento de sequía, las intensidades del SDI de los 7 meses involucrados son -2.1, -2.6, -1.5, -2.2, -2.6, -2.1 y -1.5, que al sumarlas, dan una Magnitud de +14.6 (recuérdese que la fórmula multiplica a la sumatoria por -1 para su cuantificación).

### **c) Extensión espacial**

La extensión espacial así como los daños producidos por un evento de sequía están relacionados con la intensidad y su duración, la caracterización del desarrollo espacial y temporal de un evento de sequía, nos ayuda a entender el inicio, desarrollo y el fin de este fenómeno e identifica las zonas vulnerables a sufrir mayor recurrencia estas temporadas secas.

La caracterización espacial es de mucha importancia dada su complejidad, pues son muchos los sectores afectados por este fenómeno, sus principales efectos son sociales y económicos.

El monitoreo de la sequía, nos permitirá determinar de forma oportuna medidas preventivas o acciones para reducir los impactos de las sequías hidrológicas en los diferentes sectores afectados, la respuesta y mitigación ante su ocurrencia, involucra una cuidadosa gestión de los recursos hídricos, generando planes de contingencia para reducir futuros impactos de sequía hidrológica en la sociedad.



#### 4.3.6 Análisis de riesgo de sequía hidrológica bajo el ENOS

El fenómeno de El Niño-Oscilación del Sur (ENOS), es una fluctuación energética interanual sobre el Pacífico tropical, que ha sido considerado como un factor clave para determina las condiciones secas y húmedas del Perú. Para el presente análisis se ha utilizado el Índice Oceánico El Niño (ONI) considerando los umbrales de la **Tabla 6**, obtenidos desde *The National Oceanic and Atmospheric Administration* ([http://www.cpc.ncep.noaa.gov/products/analysis\\_monitoring/ensostuff/ensoyears\\_1971-2000\\_climo.shtml](http://www.cpc.ncep.noaa.gov/products/analysis_monitoring/ensostuff/ensoyears_1971-2000_climo.shtml)).

Es importante aclarar cómo la señal ENOS afectó a la sequía hidrológica sobre las estaciones analizadas en las tres diferentes etapas de evaluación. Para hacer frente a esto, se aplica un enfoque no paramétrico de Kernel, esta es utilizada ampliamente en estadística teórica y aplicada (Bowman y Azzalini, 1997), para determinar el riesgo de sequía bajo ENOS se empleó simplemente la relación de la probabilidad del  $SDI < 0$  bajo ENOS para todas las condiciones.

$$\text{Riesgo de Sequía} = \frac{P(SDI < 0|ENSO)}{P(SDI < 0)} \quad (15)$$

Para la selección de los episodios ENOS ocurridos entre los años 1973-2013, se calculó de la media móvil de los tres meses de anomalías de la temperatura superficial del mar para la región El Niño 3.4. A partir de los promedios del Índice Oceánico de El Niño (ONI) para las temporadas de avenidas (diciembre-mayo), estiaje (junio-noviembre) y como el año hidrológico (septiembre-agosto) se determinaron las probabilidades de ocurrencia de episodios ENOS para los eventos cálidos (El Niño) y fríos (La Niña).

## V. RESULTADOS Y DISCUSIÓN

### 5.1 TRATAMIENTO DE DATOS

Las estaciones hidrométricas seleccionadas según su registro histórico, fueron evaluadas mediante una estadística descriptiva como es el análisis exploratorio de datos, este análisis evalúa parámetros estadísticos (test) que ayude a tener una visión clara de los procesos que han ocurrido durante el periodo analizado.

La **Tabla 8** muestra las estaciones seleccionadas y su registro histórico mediante líneas de tiempo coloreadas, correspondiente a un periodo de análisis de 1973 a 2013 (40 años), se consideró que la ausencia de datos no debe ser más del 10% de la longitud total del registro, de acuerdo a esta restricción las estaciones con mayor ausencia de información son:

- K105 (Km-105) ubicada en la unidad hidrográfica de Vilcanota (Vilcanota), con un total de 0.58 años de ausencia de información.


#### 5.1.1 Análisis exploratorio de datos


En análisis exploratorio, realizado a la muestra de datos hidrométricos consta de tres pruebas las cuales son: la estadística descriptiva, que nos proporciona información para clasificar y/o caracterizar los datos hidrométricos, la gráfica de BoxPlots, para detectar datos atípicos (outliers) de manera cualitativa y el estadístico de Grubbs que corrobora la presencia de estos datos atípicos (outliers).

**La estadística descriptiva** del caudal medio anual registrada en las estaciones analizadas en la Vertiente del Pacífico (VP), Vertiente del Titicaca (VT) y Vertiente del Amazonas (VA) se muestran en la **Tabla 9**.

**Tabla 9: Red de Estaciones Hidrométricas con información mensual completa.**

Dato Ausente	Código	Estación	Río	1973-1974	1974-1975	1975-1976	1976-1977	1977-1978	1978-1979	1979-1980	1980-1981	1981-1982	1982-1983	1983-1984	1984-1985	1985-1986	1986-1987	1987-1988	1988-1989	1989-1990	1990-1991	1991-1992	1992-1993	1993-1994	1994-1995	1995-1996	1996-1997	1997-1998	1998-1999	1999-2000	2000-2001	2001-2002	2002-2003	2003-2004	2004-2005	2005-2006	2006-2007	2007-2008	2008-2009	2009-2010	2010-2011	2011-2012	2012-2013										
					E-TI	EL TIGRE	TUMBES																																														
	E-CI	EL CIRUELO	CHIRA																																																		
	P-ÑA	PTE. ÑACARA	PIURA																																																		
	PUC	PUCHACA	LA LECHE																																																		
	RAC	RACARUMI	CH-LAMB																																																		
	S-DO	STO. DOMINGO	CH-HUARAL																																																		
	CHO	CHOSICA	RIMAC																																																		
	L-CA	LA CAPILLA	MALA																																																		
	SOC	SOCSI	CAÑETE																																																		
	CON	CONTA	SAN JUAN																																																		
	LET	LETRAYOC	PISCO																																																		
	HUAT	HUATIAPA	CAMANA																																																		
	ILA	PTE. ILAVE	ILAVE																																																		
	HUAN	PTE. HUANCANE	HUANCANÉ																																																		
	RAM	PTE. RAMIS	RAMIS																																																		
0.58	K105	Km-105	VILCANOTA																																																		
	SHA	REQUENA	MAYO																																																		
	BOR	SHANAO	ALTO MARAÑÓN																																																		
	CHA	CHAZUTA	HUALLAGA																																																		
	S-RE	BORJA	BAJO MARAÑÓN																																																		
	REQ	SAN REGIS	UCAYALI																																																		
	TAM	TAMSHIYACU	AMAZONAS																																																		

 : Información Hidrométrica completa

 : Información hidrométrica faltante de 7 meses de dato faltante al año

FUENTE: Elaboración propia (2015)

Las estaciones ubicadas geográficamente en la zona norte de la VP (E-TI y E-CI), son de carácter caudaloso, con un caudal medio anual superior a 114.85 m<sup>3</sup>/s, estas estaciones registran el caudal pertenecientes a dos cuenca binacional (Perú-Ecuador) respectivamente. Mientras que las estaciones ubicadas en la zona central de la VP (S-DO, CHO y L-CA), registraron un caudal medio aproximado de 21.63 m<sup>3</sup>/s.

Las estaciones localizadas en la VT (ILA, HUAN y RAM) registraron un caudal medio aproximado de 43.90 m<sup>3</sup>/s.

La estación TAM ubicada en la VA, considerada muy caudaloso, presentaron un caudal medio aproximado de 31522 m<sup>3</sup>/s.

La estadística descriptiva muestra una alta variabilidad de la escorrentía superficial (caudales) en función de la latitud y del área de la cuenca que lo produce.

La **Tabla 10** muestra el resumen de la estadística descriptiva del caudal promedio anual de las estaciones analizadas de la VP, VT y VA del Perú.

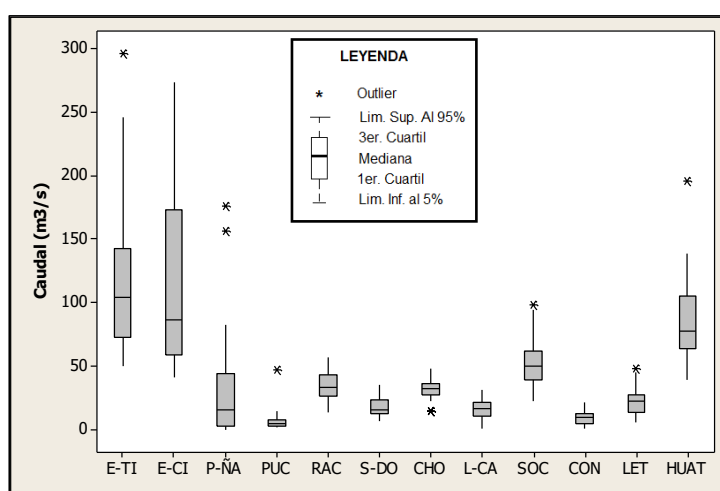
**Tabla 10: Resumen de la Estadística descriptiva de caudales anuales (m<sup>3</sup>/s).**

	Código	Estación	Unidad Hidrográfica	Río	Min	Máx	Media	Desv. Típica
VP	E-TI	El Tigre	Tumbes	Río Tumbes	50.30	296.45	113.98	55.90
	E-CI	El Ciruelo	Chira	Río Chira	40.95	273.83	115.72	65.00
	P-ÑA	Puente Ñacara	Piura	Río Piura	0.00	176.37	29.69	39.01
	PUC	Puchaca	La Leche	Río La Leche	1.62	46.84	6.59	7.24
	RAC	Racarrumi	Chancay Lambayeque	Río Ch. Lambayeque	14.07	56.70	34.37	10.73
	S-DO	Santo Domingo	Chancay Huaral	Río Ch. Huaral	7.29	35.11	17.32	6.45
	CHO	Chosica	Rímac	Río Rímac	14.55	47.85	31.81	7.28
	L-CA	La Capilla	Mala	Río Mala	0.98	31.18	15.76	7.01
	SOC	Socsi	Cañete	Río Cañete	22.55	98.92	52.31	18.18
	CON	Conta	San Juan	Río San Juan	0.53	21.74	9.98	5.44
	LET	Letrayoc	Pisco	Río Pisco	5.70	48.71	21.76	9.57
HUAT	Huatiapa	Camaná	Río Camaná	38.95	195.56	85.24	31.42	
VT	ILA	Ilave	Ilave	Río Ilave	4.91	98.17	37.16	19.99
	HUAN	Huancané	Huancané	Río Huancané	7.24	39.46	19.23	7.98
	RAM	Ramis	Ramis	Río Ramis	32.36	116.12	75.30	21.54
VA	K105	Km-105	Vilcanota	Río Vilcanota	81.01	168.71	124.15	23.45
	SHA	Shanao	Mayo	Río Mayo	345.38	522.07	409.79	39.33
	BOR	Chazuta	Bajo Huallaga	Río Huallaga	3425.83	5609.38	4785.30	587.85
	CHA	Borja	Alto Marañón	Río Marañón	2610.73	4729.13	3318.38	433.20
	S-RE	San Regis	Bajo Marañón	Río Marañón	14491.40	21230.93	17901.96	1736.07
	REQ	Requena	Ucayali	Río Ucayali	9330.02	20180.72	14350.13	2774.13
	TAM	Tamishiyacu	Amazonas	Río Amazonas	24475.18	39162.43	31522.00	3662.45

FUENTE: Elaboración propia (2016)

La gráfica de Boxplot, correspondiente a los caudales medios anuales de las estaciones analizadas en la VP muestra un patrón común, la media y la desviación estándar aumentan en las estaciones ubicadas cerca al Ecuador, donde hay presencia de datos extremos (probables outliers), estos ríos son de régimen caudaloso.

Se identificó que las estaciones próximas al trópico tienen un gran número de observaciones alejadas 5 veces del valor del rango intercuartil (cuartiles 1 y 3), los que podrían considerarse como valores atípicos. Sin embargo al examinar la totalidad de las estaciones, no es posible considerar tales valores como atípicos, ya que provienen de una muestra atribuida a un fenómeno global como es El Niño Oscilación del Sur (ENOS), por tanto no se considera como datos atípicos a las observaciones explicadas por un fenómeno natural.



**Figura 8: Gráfica de cajas del caudal anual en la VP.**

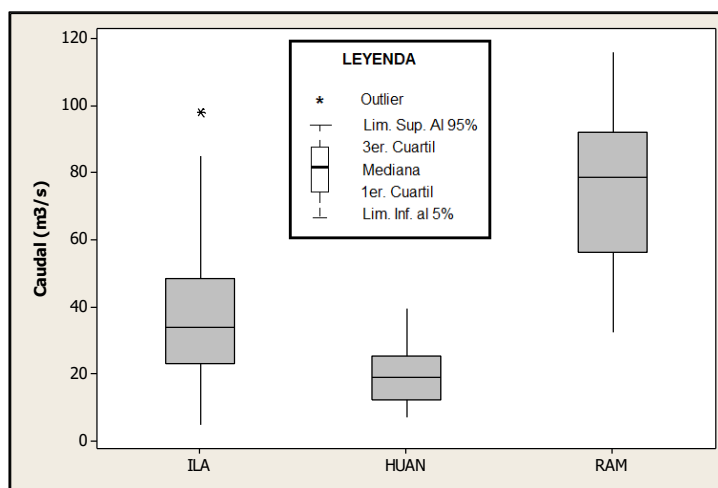
FUENTE: Elaboración Propia (2016)

La **Figura 8** muestra la distribución de los caudales medios anuales (m<sup>3</sup>/s) de las 12 estaciones hidrométricas analizadas pertenecientes a VP, estas se encuentran ordenadas según su ubicación geográfica (latitud) de norte a sur.

La gráfica Boxplot, muestra la presencia de valores atípicos, estos valores son más recurrentes durante los eventos de El Niño Oscilación del Sur (ENOS) del año 1982-83 y 1997-98, los datos clasificados como atípicos pierden significancia al examinar la totalidad de las estaciones, ya que estas presentan una tendencias similares a las estaciones vecinas.

El tamaño de la cajas nos indica una alta variabilidad del comportamiento hídrico que poseen estas cuencas, las estaciones hidrométricas E-TI (El Tigre), ubicada en la cuenca del río Tumbes y E-CI (El Ciruelo), ubicada en la cuenca del río Chira, ambos poseen una alta variabilidad por encontrarse cerca al trópico (cuencas binacionales Perú - Ecuador), la estación HUAT (Huatiapa), ubicado en la cuenca del río Camaná, presenta el caudal promedio anual multianual de 85.24 m<sup>3</sup>/s superior al de las estaciones vecinas, este caudal es explicado por la presencia de glaciares, la fusión del hielo aporta el recurso hídrico a la cuenca del río Camaná.

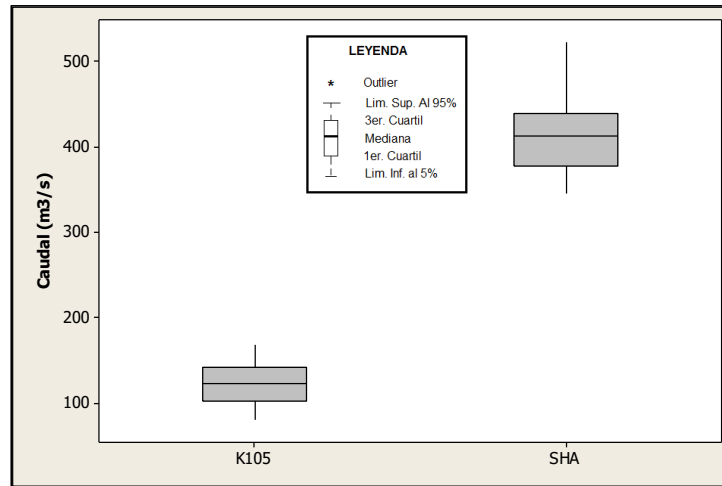
La **Figura 9** muestra las estaciones analizadas en la VT muestra con un patrón en común. La estación hidrométrica RAM (Pte. Ramis), ubicada en el río Ramis, presenta el mayor caudal promedio anual multianual de las 3 estaciones analizadas con 75.3 m<sup>3</sup>/s.



**Figura 9: Gráfica de cajas del caudal anual en la VT.**

FUENTE: Elaboración Propia (2016)

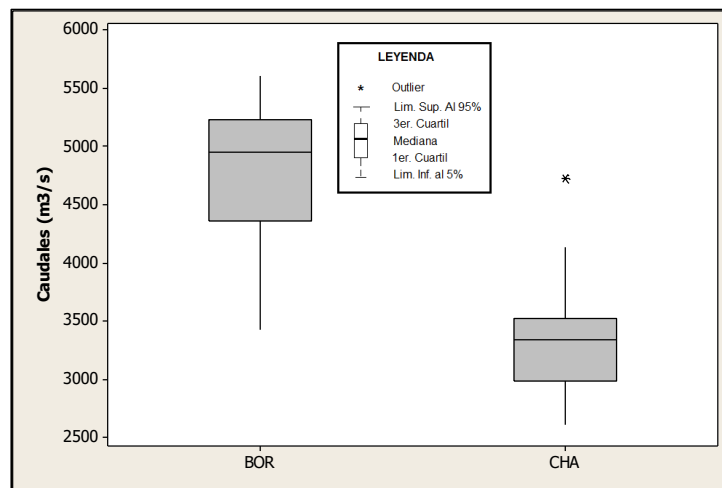
La **Figura 10** muestra la distribución de los caudales medio anuales ( $m^3/s$ ) de las estaciones hidrométricas K105 (Km-105) y SHA (Shanao) pertenecientes a los ríos Vilcanota y Mayo de la VA.



**Figura 10:** Gráfica de cajas del caudal anual en K105 y SHA de la VA.

FUENTE: Elaboración Propia (2016)

La **Figura 11** muestra la distribución de los caudales medio anuales ( $m^3/s$ ) de las estaciones hidrométricas BOR (Borja) y CHA (Chazuta) pertenecientes a los ríos Marañón y Huallaga de la VA.

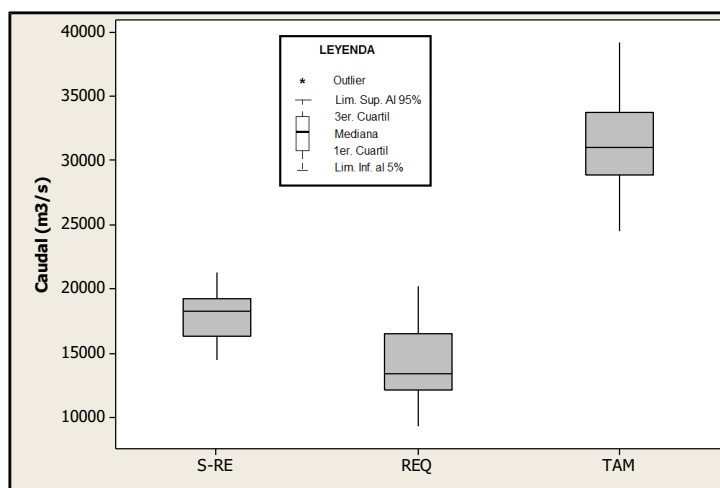


**Figura 11:** Gráfica de cajas del caudal anual en BOR y CHA de la VA.

FUENTE: Elaboración Propia (2016)

La **Figura 12** muestra la distribución de los caudales medio anuales (m<sup>3</sup>/s) de las estaciones hidrométricas S-RE (San Regis), REQ (Requena) y TAM (Tamishiyacu) pertenecientes a los ríos Marañón, Ucayali y Amazonas de la VA.

La estación hidrométrica TAM (Tamishiyacu), presenta el mayor caudal promedio anual multianual de las 7 estaciones analizadas con 31522 m<sup>3</sup>/s.



**Figura 12: Gráfica de cajas del caudal anual en S-RE, REQ y TAM de la VA.**

FUENTE: Elaboración Propia (2016)

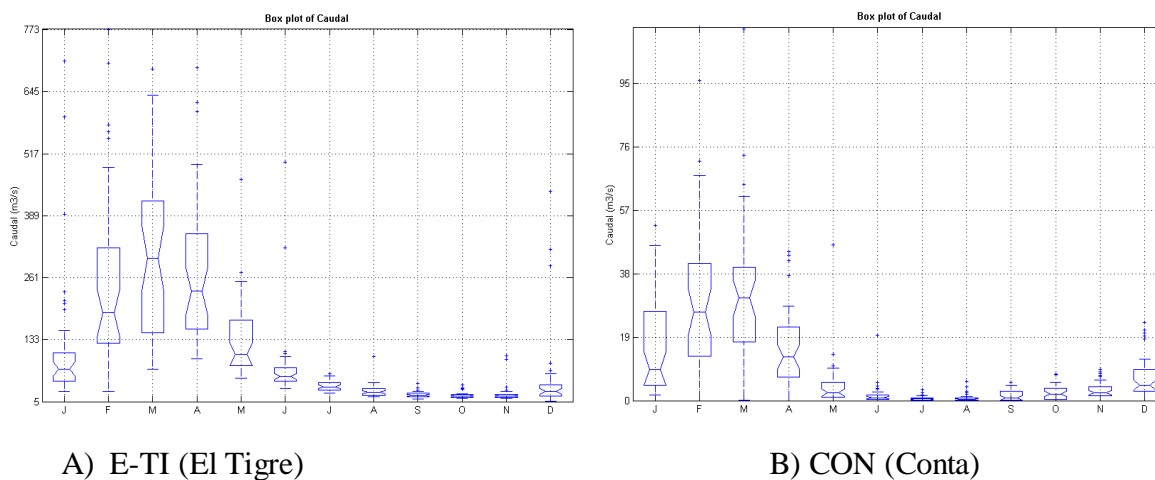
La **Figura 13** muestra la distribución de los caudales a nivel mensual de las estaciones hidrométricas E-TI (El Tigre) y CON (Conta), la gráfica de cajas muestra la presencia de valores atípicos (1.5 veces del rango intercuartil) durante los meses lluviosos (diciembre - abril) y son recurrentes en los ENOS del año 1982-83 y 1997-98.

Los cuantiles mensuales producidos en los años 1982-83 y 1997-98 son semejantes a las estaciones vecinas, descartando la condición de datos atípicos (datos dudosos) y aceptamos que los datos provienen de un fenómeno global (ENOS).



En la **Figura 13 (A)** se muestra el comportamiento hídrico mensual de la estación E-TI (El Tigre) con respecto a la media y la desviación estándar, los caudales aumentan en los meses lluviosos (diciembre - mayo), mientras que los meses de estiaje (junio - noviembre) estos valores tienden a disminuir. De esta manera se demuestra que los caudales tienen una marcada estacionalidad (temporada de avenidas y estiaje), de igual manera se demuestra el comportamiento estacionario a nivel anual (ciclo hidrológico).

En la **Figura 13 (B)** se muestra la distribución de los caudales mensuales de la estación hidrométrica CON (Conta), la gráfica de cajas muestra los valores atípicos que se producen en los meses lluviosos (diciembre - mayo), mientras que en los meses de estiaje, estos valores disminuyen, la variabilidad mensual del caudal que se produce en la cuenca San Juan es mínima pues el rango de caudales aforados fluctúa entre 0.0 m<sup>3</sup>/s (meses de estiaje) a 111.92 m<sup>3</sup>/s (meses de avenidas), la estación hidrométrica CON se caracteriza por encontrarse en una zona climática árida (Ica).



**Figura 13: Gráfica de cajas del caudal mensual.**

FUENTE: Elaboración Propia (2016)

En el **Anexo II** se muestran las gráficas de cajas (Boxplot) a un paso de tiempo mensual para cada una de las veintidós estaciones hidrométricas analizadas.

Otro procedimiento que ayude a confirmar estos posibles valores atípicos, es el Test de Grubbs, este evalúa la data estandarizada y su longitud de registro, definiendo un nivel de truncamiento, este nivel para un registro de cuarenta y un años (1973-2013) es ( $G_{crítico} = 3.2505$ ).

La prueba de Grubbs evalúa la detección de datos atípicos, la **Tabla 11** presenta la detección de datos atípicos en los valores de caudales medios máximos anuales en las estaciones hidrométricas E-TI (El Tigre), P-ÑA (Puente Ñacara), PUC (Puchaca) y HUAT (Huatiapa) en la VP.

En la estación hidrométrica ILA (Ilave) de la VT se detectó un valor de caudal medio máximo anual atípico de 98.17 m<sup>3</sup>/s.

En la estación hidrométrica CHA (Chazuta) de la VA se detectó un valor de caudal medio máximo anual atípico de 4729.13 m<sup>3</sup>/s.

Aplicando la ecuación del anexo I se obtiene el estadístico “*G min Calc*” y “*G max Calc*” para cada data observada (**Tabla 11**).

**Tabla 11: Resumen de Test de Grubbs para las 22 estaciones.**

	Código	Estación	Valor Min (m <sup>3</sup> /s)	G min Calc	Valor Min atípico Grubbs	Valor Máx (m <sup>3</sup> /s)	G max Calc	Valor Máx atípico Grubbs
VP	E-TI	El Tigre	50.30	1.14	No	296.45	3.26	Si
	E-CI	El Ciruelo	40.95	1.15	No	273.83	2.43	No
	P-ÑA	Puente Ñacara	0.00	0.76	No	176.37	3.76	Si
	PUC	Puchaca	1.62	0.69	No	46.84	5.56	Si
	RAC	Racarrumi	14.07	1.89	No	56.70	2.08	No
	S-DO	Santo Domingo	7.29	1.55	No	35.11	2.76	No
	CHO	Chosica	14.55	2.37	No	47.85	2.20	No
	L-CA	La Capilla	0.98	2.11	No	31.18	2.20	No
	SOC	Socsi	22.55	1.64	No	98.92	2.56	No
	CON	Conta	0.53	1.74	No	21.74	2.16	No
	LET	Letrayoc	5.70	1.68	No	48.71	2.82	No
HUAT	Huatiapa	38.95	1.47	No	195.56	3.51	Si	
VT	ILA	Ilave	4.91	1.61	No	98.17	3.05	Si
	HUAN	Huancané	7.24	1.50	No	39.46	2.53	No
	RAM	Ramis	32.36	1.99	No	116.12	1.90	No
VA	K105	Km-105	81.01	1.84	No	168.71	1.90	No
	SHA	Shanao	345.38	1.64	No	522.07	2.85	No
	BOR	Borja	3425.83	2.31	No	5609.38	1.40	No
	CHA	Chazuta	2610.73	1.63	No	4729.13	3.26	Si
	S-RE	San Regis	14491.40	1.96	No	21230.93	1.92	No
	REQ	Requena	9330.02	1.81	No	20180.72	2.10	No
	TAM	Tamishiyacu	24475.18	1.92	No	39162.43	2.09	No

FUENTE: Elaboración propia (2016)

Se prueba la siguiente hipótesis:

H0: No hay valores atípicos en los datos

H1: El valor mínimo o máximo de los datos observados es un valor atípico.

Para 41 datos observados y un nivel de significancia de  $\alpha = 0.01$  se tiene un G crítico de 3.2505 y un p-valor de 0.0002, de aquí se desprende que los valores de “Gcalc > Gcrítico” hacen que se rechace la hipótesis nula y aceptar la hipótesis alterna.

Como resultado del análisis exploratorio de datos (AED), se encontró una alta variabilidad de la oferta hídrica con excesos en la zona norte y déficit en el sur de la VP, debido a esta variabilidad el factor antrópico es de importancia en la regulación y aprovechamiento de los recursos hídricos, es así que en la costa peruana se encuentran los principales proyectos hidráulicos del Perú.

Las cuencas que por su formación geológica son reguladas, se analizaron dado su importancia, comprobando que la mayoría de las unidades hidrográficas (UH) no han sufrido alteraciones de su oferta hídrica a excepción de:

- La UH Chancay-Lambayeque y la UH Ica, han sufrido el trasvase de las aguas de la Vertiente del Atlántico al Pacífico incrementando la oferta hídrica en la RAC (Raca Rumi) cuenca del río Chancay y en CON (Conta) cuenca del río Ica.
- La UH Rímac, son cuencas altamente reguladas y el aprovechamiento hídrico (Rímac) del que se hace uso, ocasionan la desnaturalización del caudal registrado en la estación hidrométrica CHO (Chosica).

Como síntesis se observó que el comportamiento hídrico en las secciones de control a lo largo de la costa peruana, corresponden mayoritariamente a cuencas naturales a excepción de las cuencas mencionadas líneas arriba por presentar trasvases y/o exceso del aprovechamiento hídrico (desnaturalización de caudales), sin embargo estas serán analizadas dada la importancia.

Las cuencas que albergan los grandes proyectos hidráulicos tendrán el mismo análisis que las cuencas naturales, ya que las estaciones que registran el comportamiento hídrico se ubican río arriba de estos grandes proyectos hidráulicos.

En la VT se encontró similar variabilidad de la oferta hídrica con excesos en la temporada de avenidas y déficit en la temporada de estiaje.

En la VA se encontró comportamiento bimodal en las estaciones hidrométricas de SHA y CHA principalmente este se debe a los dos regímenes de lluvias de los andes y amazónicos.

### 5.1.2 Agrupamiento de estaciones (Regionalización)

La agrupación de estaciones con un comportamiento hídrico similar (regionalización) se obtuvo aplicando el Método del Vector Regional (MVR).

Los resultados de la variable analizada (caudal medio anual), muestran que las estaciones hidrométricas (EH) localizadas en la Vertiente del Pacífico (VP), Vertiente del Titicaca (VT) y Vertiente del Amazonas (VA) las cuales se agruparon en tres, una y cuatro regiones estadísticamente homogéneas respectivamente, cada una de ellas con una alta correlación con el Vector.

En el **Anexo III** se muestran las estaciones agrupadas por regiones estadísticamente homogéneas con una alta correlación con el Vector.

**Tabla 12: Resumen de regiones homogéneas formadas por el MVR.**

	Código	Estación	Unidad Hidrográfica	Río	Región	Correl. /Vector	D.E. Desvíos
VP	E-TI	El Tigre	Tumbes	Río Tumbes	VP-ZN	0.77	0.40
	E-CI	El Ciruelo	Chira	Río Chira	VP-ZN	0.80	0.37
	P-ÑA	Puente Ñacara	Piura	Río Piura	VP-ZN	0.92	0.51
	PUC	Puchaca	La Leche	Río La Leche	VP-ZN	0.90	0.85
	RAC	Racarrumi	Chancay Lambayeque	Río Ch. Lambayeque	VP-ZN	0.73	0.45
	S-DO	Santo Domingo	Chancay Huaral	Río Ch. Huaral	VP-ZC	0.81	0.21
	CHO	Chosica	Rímac	Río Rímac	VP-ZC	0.77	0.18
	L-CA	La Capilla	Mala	Río Mala	VP-ZC	0.79	0.28
	SOC	Socsi	Cañete	Río Cañete	VP-ZC	0.87	0.17
	CON	Conta	San Juan	Río San Juan	VP-ZS	0.93	0.23
	LET	Letrayoc	Pisco	Río Pisco	VP-ZS	0.82	0.25
	HUAT	Huatiapa	Camaná	Río Camaná	VP-ZS	0.72	0.28
VT	ILA	Ilave	Ilave	Río Ilave	VT	0.87	0.26
	HUAN	Huancané	Huancané	Río Huancané	VT	0.93	0.17
	RAM	Ramis	Ramis	Río Ramis	VT	0.94	0.14
VA	K105	Km-105	Vilcanota	Río Vilcanota	VA-Z1	-	-
	SHA	Shanao	Mayo	Río Mayo	VA-Z2	-	-
	CHA	Chazuta	Bajo Huallaga	Río Huallaga	VA-Z3	-	-
	BOR	Borja	Alto Marañón	Río Marañón	VA-Z4	0.96	0.04
	S-RE	San Regis	Bajo Marañón	Río Marañón	VA-Z4	0.83	0.11
	REQ	Requena	Ucayali	Río Ucayali	VA-Z4	0.98	0.02
	TAM	Tamishiyacu	Amazonas	Río Amazonas	VA-Z4	0.78	0.08

FUENTE: Elaboración propia (2016)

La **Tabla 12** muestra el resultado de las regiones formadas por el MVR, estas presentan una alta correlación con el vector, de este análisis se obtuvo tres regiones con un comportamiento hídrico similar en la VP, estas se encuentran ubicadas geográficamente de norte a sur las cuales presentan un régimen irregular, con las marcadas diferencias en temporada de avenidas y estiaje y cuyas características mencionamos a continuación.

**Región VP-ZN**, conformada por cinco estaciones hidrométricas (E-TI, E-CI, ÑAC, PUC Y RAC) se encuentran ubicadas en la zona norte de la vertiente del Pacífico (VA-ZN) del Perú, esta región presenta un rango del caudal promedio multianual máximo de 296.45 m<sup>3</sup>/s y una mínima de 0 m<sup>3</sup>/s, siendo el caudal promedio 60.07 m<sup>3</sup>/s, la variabilidad multianual de esta región no representa un cambio significativo de la oferta hídrica.

**Región VP-ZC**, conformada por cinco estaciones hidrométricas (S-DO, CHO, L-CA y SOC) se encuentran ubicadas en la zona centro de la vertiente del Pacífico (VA-ZC) del Perú, esta región presenta un rango del caudal promedio multianual máximo de 98.92 m<sup>3</sup>/s y una mínima de 0.98 m<sup>3</sup>/s, siendo el caudal promedio 29.3 m<sup>3</sup>/s, la variabilidad multianual de esta región no representa un cambio significativo de la oferta hídrica.

**Región VP-ZS**, conformada por cinco estaciones hidrométricas (CON, LET y HUAT) se encuentran ubicadas en la zona sur de la vertiente del Pacífico (VA-ZS) del Perú, esta región presenta un rango del caudal promedio multianual máximo de 195.56 m<sup>3</sup>/s y una mínima de 0.53 m<sup>3</sup>/s, siendo el caudal promedio 85.24 m<sup>3</sup>/s, la variabilidad multianual de esta región no representa un cambio significativo de la oferta hídrica.

**Región VT**, conformada por las tres estaciones hidrométricas (ILA, RAM y HUAN) de la vertiente del Titicaca, estas con comportamiento hídrico similar y alta correlación con el vector, estas se encuentran ubicadas geográficamente en el Altiplano andino peruano las cuales presentan un régimen irregular, con las marcadas diferencias en temporada de avenidas y estiaje y cuyas características mencionamos a continuación.

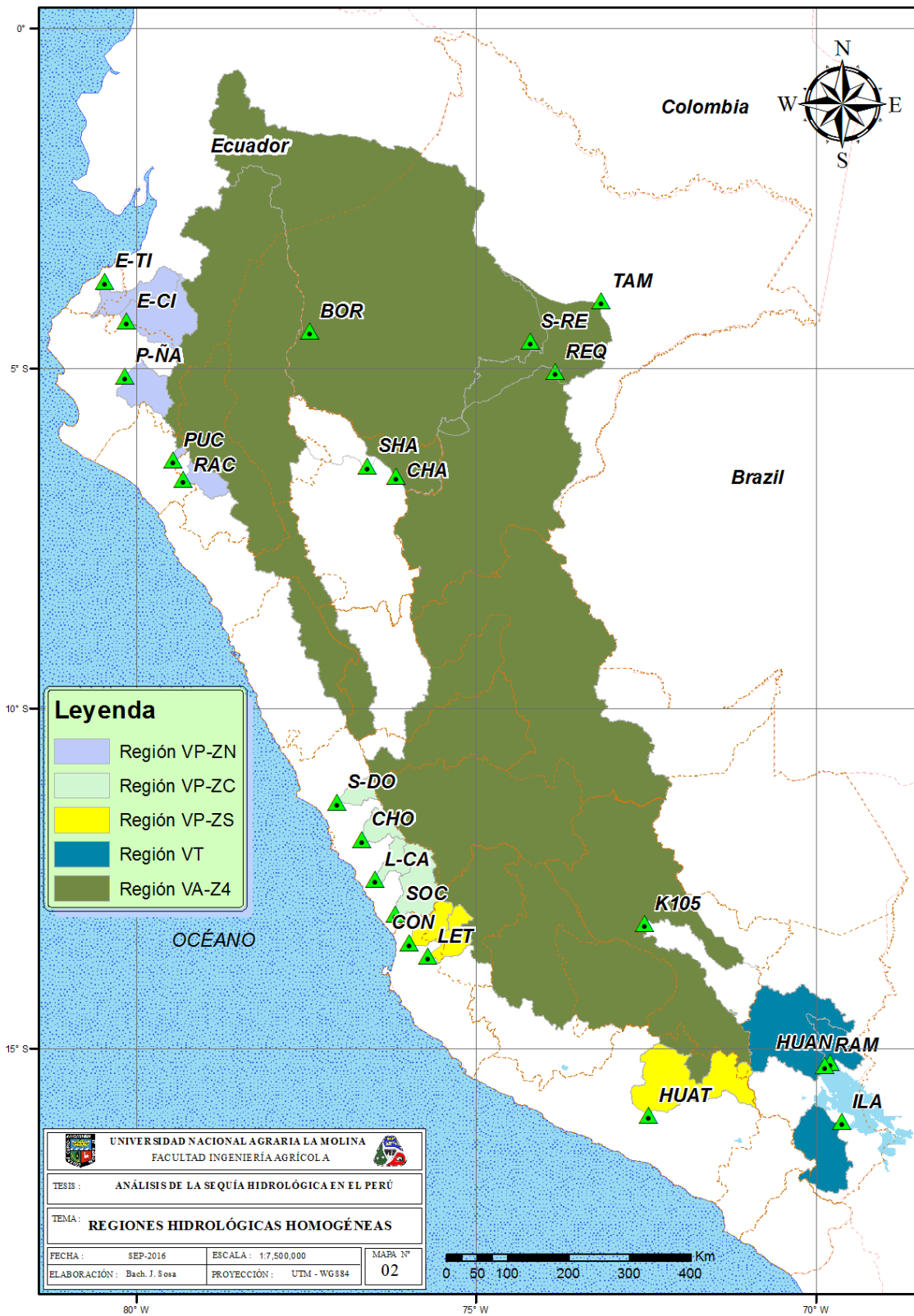
La **Región VT**, conformada por tres estaciones hidrométricas (ILA, HUAN y RAM) se encuentra ubicada en el sur del Perú, esta región presenta un rango del caudal promedio multianual máximo de 116.12 m<sup>3</sup>/s y una mínima de 4.91 m<sup>3</sup>/s, siendo el caudal promedio 43.9 m<sup>3</sup>/s, la variabilidad multianual de esta región no representa un cambio significativo de la oferta hídrica.

Para la VA se determinó una región hidrológicamente homogénea denominada zona 4 de la vertiente del Amazonas (VA-Z4) la que cuenta con alta correlación con el Vector.

La **Región VA-Z4**, conformada por tres estaciones hidrométricas (BOR, S-RE, REQ y TAM) se encuentra ubicada en la región nororiental de la amazónica del Perú, esta región presenta un rango del caudal promedio multianual máximo de 39162.43 m<sup>3</sup>/s y una mínima de 3425.83 m<sup>3</sup>/s, siendo el caudal promedio 17139.85 m<sup>3</sup>/s, la variabilidad multianual de esta región no representa un cambio significativo de la oferta hídrica.

La **Figura 14** muestra las estaciones hidrométricas con un comportamiento homogéneo del caudal promedio anual, agrupadas en tres regiones hidrológicas para la VP, una región hidrológica para la VT y cuatro regiones hidrológicas para la VA.

La región VP-ZN está formada por cinco estaciones hidrométricas (color celeste), ubicadas en el norte de la VP, la región VP-ZC se encuentra en el Centro de la VP, entre la región VP-ZN y VP-ZS, formada por cuatro estaciones hidrométricas (color verde claro), la región VP-ZS se encuentra en el sur del VP, conformada por tres estaciones hidrométricas (color amarillo). En la región VT se ubica en el Altiplano andino del Perú, conformadas por tres estaciones hidrométricas (color azul marino). En la VA se encuentra la región VA-Z4, ubicada en la región nororiental amazónica, conformada por cuatro estaciones hidrométricas (color verde) todas ellas con una alta correlación con el Vector.



**Figura 14: Estaciones agrupadas con un comportamiento hidrológicamente homogéneo del caudal promedio anual (1973-2013).**

FUENTE: Elaboración Propia (2016)



### 5.1.3 Análisis de Tendencia y quiebres

Se analizó dos supuestos básicos: Homogeneidad (libre de tendencia) y estacionariedad (constante en el tiempo), estos análisis aumentan la confiabilidad de los datos, detectando anomalías producidas por la actividad antrópica (trasvases y/o represamiento).

Se evaluaron estadísticamente aplicando dos pruebas no paramétricas, estas son:

#### a) Análisis de tendencia

La prueba no-paramétrica más utilizada para la identificación de tendencia en series de variables hidrometeorológicas es la prueba de Mann Kendall, la autocorrelación presente en series de caudal afecta los resultados de la prueba, causando problemas en la detección y evaluación del nivel de significancia, la presencia de autocorrelación positiva tiende a aumentar la probabilidad de detección de tendencia, cuando en realidad esta no existe, mientras que la autocorrelación negativa tiende a disminuirla (Yue et al., 2002).

Para corregir este efecto, Yue et al., (2002) presentaron una técnica de pre-blanqueo que remueve la correlación serial sin alterar la tendencia presente en la serie. Esta última técnica fue aplicada a la serie de caudal medio anual, puesto que esta variable hidrológica presenta correlaciones seriales.

La **Tabla 13** muestra el resultado del análisis de tendencia aplicando el estadístico de Mann Kendall modificado para un nivel de significancia de  $\alpha = 0.05$ .

Los datos analizados corresponden al caudal promedio anual multianual de cada estación hidrométrica, con un registro continuo de 41 años, evaluando la siguiente hipótesis.

H0 (Hipótesis Nula) : No existe una tendencia en la serie analizada

H1 (Hipótesis Alternativa) : Hay una tendencia en la serie

Del resultado de la **Tabla 13**, se observa que:

La Hipótesis Nula (H0): No existe una tendencia en la serie analizada

En la VP cinco de las estaciones hidrométricas analizadas cumplen la hipótesis nula para un nivel de significancia del 5%, a excepción de P-ÑA (Puente Ñacara), RAC (Racarrumi), CHO (Chosica), CON (Conta), SOC (SOCSI), LET (Letrayoc) y HUANT (Huatiapa) estas son consideradas cuencas antropizadas.

En la VT la mayoría de las estaciones analizadas cumplen la hipótesis nula para un nivel de significancia del 5%, a excepción de la estación hidrométrica ILA (Ilave), esta presenta tendencia decreciente en el registro de caudal promedio anual multianual de la serie analizada.

En la VA la mayoría de las estaciones analizadas cumplen la hipótesis nula para un nivel de significancia del 5%, a excepción de la estación hidrométrica BOR (Borja), asimismo se detectó cuatro estaciones hidrométricas que no cumplen la hipótesis nula para un nivel de significancia del 1% estas son CHA (Chazuta), S-RE (San Regis), REQ (Requena) y TAM (Tamishiyacu) todas estas mencionadas presentan tendencias decrecientes en el registro de caudal promedio anual multianual de la serie analizada, para comprobar este resultado se aplicaran otras pruebas estadísticas que corroboren el aumento o disminución del caudal registrado en esta estación.

Recientemente Lavado et al. (2012) realizó un estudio de la tendencia de los caudales sobre la vertiente del Amazonas donde se aprecia un descenso especialmente desde mediados de los años ochenta y durante la temporada baja. Sobre la vertiente del Titicaca el estudio indica unos aumentos en la escorrentía mínima pueden asociarse con el derretimiento acelerado de los glaciares debido al cambio climático. Asimismo los valores mínimos de escurrimiento en casi todas las cuencas costeras muestran algunos cambios (puntos de cambio y tendencias) durante los últimos 35 años. Finalmente concluye que como no están relacionados con los cambios de lluvia y no están espacialmente organizados, pueden atribuirse a la actividad humana.

**Tabla 13: Resumen del Test de Mann Kendall para el análisis de Tendencia.**

	<b>Código</b>	<b>Estación</b>	<b>Mann-Kendall</b>	<b>Tendencia</b>
<b>VP</b>	E-TI	El Tigre	NS	Serie tiempo estacional
	E-CI	El Ciruelo	NS	Serie tiempo estacional
	P-ÑA	Puente Ñacara	<b>S(0.1)</b>	<b>Antropizada</b>
	PUC	Puchaca	NS	Serie tiempo estacional
	RAC	Racarrumi	NS	<b>Antropizada</b>
	S-DO	Santo Domingo	NS	Serie tiempo estacional
	CHO	Chosica	<b>S(0.05)</b>	<b>Antropizada</b>
	L-CA	La Capilla	NS	Serie tiempo estacional
	SOC	Socsi	NS	<b>Antropizada</b>
	CON	Conta	<b>S(0.1)</b>	<b>Antropizada</b>
	LET	Letrayoc	<b>S(0.05)</b>	<b>Antropizada</b>
	HUAT	Huatiapa	NS	<b>Antropizada</b>
<b>VT</b>	ILA	Ilave	<b>S(0.1)</b>	<b>Decreciente</b>
	HUAN	Huancané	NS	Serie tiempo estacional
	RAM	Ramis	NS	Serie tiempo estacional
<b>VA</b>	K105	Km-105	NS	Serie tiempo estacional
	SHA	Shanao	NS	Serie tiempo estacional
	BOR	Borja	NS	Serie tiempo estacional
	CHA	Chazuta	<b>S(0.05)</b>	<b>Decreciente</b>
	S-RE	San Regis	<b>S(0.01)</b>	<b>Decreciente</b>
	REQ	Requena	<b>S(0.01)</b>	<b>Decreciente</b>
	TAM	Tamishiyacu	<b>S(0.01)</b>	<b>Decreciente</b>

<b>Leyenda</b>
NS: No Significativa
S(0.01): Significativa, Nivel de Significancia 1%
S(0.05): Significativa, Nivel de Significancia 5%
S(0.1): Significativa, Nivel de Significancia 10%

FUENTE: Elaboración propia (2016)

## b) Análisis de homogeneidad

Se aplicó el test de *T-Student* para el análisis de homogeneidad y rotura de serie o cambios en la media, para verificar la homogeneidad del caudal registrado durante cuarenta y un años continuos. La hipótesis evaluada para un nivel de significancia del 5%. ( $\alpha = 0.05$ ) con *T-Student* crítico ( $T_t$ ) = 2.023, de aquí se desprende que los valores de  $T_d < T_t$  se hacen que se acepte la hipótesis nula y se rechace la hipótesis alterna considerando como serie homogénea.

Se prueba la siguiente hipótesis:

$H_0$  (Hipótesis Nula) : Los datos son homogéneos

$H_1$  (Hipótesis Alternativa) : hay una fecha de cambio en la media de los datos

Mediante la aplicación de esta prueba, se detectaron cambios importantes en la serie histórica del caudal promedio anual multianual de las estaciones analizadas, en total se detectaron cinco estaciones que han sufrido cambios con respecto al caudal promedio anual multianual registrado.

Aplicando la ecuación del **Anexo I** se obtiene el estadístico *T-Student* calculado ( $T_d$ ) para cada data observada.

Adicionalmente se consideró obtener el estadístico *Cusum*, de la distribución *Free CUSUM* (no-paramétrico) mediante el *software TREND*, para determinar los saltos o cambios en la media/mediana y el año de cambio para cada data observada (**Tabla 14**).

**Tabla 14: Resumen del Test de T-Student y Cusum para el análisis de homogeneidad.**

	Código	Estación	Td	Student's T	Cusum	Año de cambio (T)
VP	E-TI	El Tigre	0.845	SH	NS	1991
	E-CI	El Ciruelo	0.911	SH	NS	1997
	P-ÑA	Puente Ñacara	1.317	SH	NS	1992
	PUC	Puchaca	1.154	SH	NS	1997
	RAC	Racarrumi	1.931	SH	S(0.1)	1992
	S-DO	Santo Domingo	0.724	SH	NS	2010
	CHO	Chosica	2.383	NH	S(0.1)	1980
	L-CA	La Capilla	1.603	SH	NS	1997
	SOC	Socsi	0.609	SH	S(0.1)	1992
	CON	Conta	1.635	SH	S(0.05)	1997
	LET	Letrayoc	1.712	SH	S(0.05)	1992
	HUAT	Huatiapa	0.207	SH	NS	2010
VT	ILA	Ilave	1.344	SH	S(0.05)	1989
	HUAN	Huancané	0.259	SH	NS	1988
	RAM	Ramis	0.250	SH	NS	2010
VA	K105	Km-105	1.208	SH	NS	1999
	SHA	Shanao	1.496	SH	NS	1991
	BOR	Borja	0.251	SH	NS	2006
	CHA	Chazuta	3.142	NH	S(0.1)	1992
	S-RE	San Regis	2.229	NH	S(0.05)	1989
	REQ	Requena	5.443	NH	S(0.01)	1994
	TAM	Tamishiyacu	2.967	NH	S(0.05)	1989

FUENTE: Elaboración propia (2016)

De la **Tabla 14** se observa que el *T-Student* calculado (Td) es menor que el nivel de significancia ( $\alpha = 0.05$ ) en la mayoría de las estaciones evaluadas, cuyo estadístico acepta la hipótesis nula  $H_0$ . Así mismo, se observa que se han producido cambios en la serie histórica entre años (1980-1994) en las estaciones CHO (Chosica), CHA (Chazuta), S-RE (San Regis), REQ (Requena) y TAM (Tamishiyacu), estas estaciones son consideradas no homogéneas dado que su registro promedio anual multianual ha cambiado debidos a factores antrópicas (trasvases o represamiento) u otros factores climáticos, alterando la oferta hídrica de la cuenca en un determinado año.

#### 5.1.4 Cálculo del índice de sequía de caudales (SDI)

El desarrollo del índice de sequía de caudal (SDI) permite cuantificar los eventos de sequía hidrológica producidos en la vertiente del Pacífico (VP), en la Vertiente del Titicaca (VT) y en la Vertiente Amazonas (VA), nos permitirá realizar la comparación espacial y temporal de las condiciones hidrológicas de un río o conjunto de ríos, para tal fin se evaluó la variable caudal mensual en cada una de las estaciones seleccionadas del ámbito de estudio, que permita identificar y caracterizar los eventos de sequía hidrológica ocurridas (1973 – 2013).

Para el análisis de sequía de esta investigación se propone analizar las temporadas de avenidas y de estiaje de la siguiente manera, un  $k = 2$  para un SDI-6 correspondiente a los meses de caudales acumulados de diciembre a mayo y a los meses de los caudales acumulados de junio a noviembre respectivamente. De la ecuación 1 se supone que una serie temporal de los volúmenes de caudal mensual  $Q_{i,j}$ , donde  $i$  denota el año hidrológico y  $j$  del mes dentro de ese año hidrológico ( $j = 1$  para primer mes de análisis y  $j = 6$  para para el último mes de análisis del año). Basado en cuarenta series de seis meses de evaluación.

Para el análisis de sequía para el año hidrológico se considera un  $k = 4$  para un SDI-12 correspondiente a los meses de los caudales acumulados de septiembre a agosto. De misma forma, de la ecuación 1 se supone que una serie temporal de los volúmenes de caudal mensual  $Q_{i,j}$ , donde  $i$  denota el año hidrológico y  $j$  del mes dentro de ese año hidrológico ( $j = 1$  para primer mes de análisis y  $j = 12$  para para el último mes de análisis del año). Basado en cuarenta series de doce meses de evaluación.

Antes de someter las series de caudales mensuales a la caracterización del SDI, se debe de ajustar cada serie a una distribución logarítmica normal de dos parámetros, para esta transformación basta en tomar logaritmos naturales de los caudales acumulados de acuerdo a periodo de referencia considerado. La cual se aplica luego de pasar un test de normalidad para la serie de tiempo en evaluación utilizando el coeficiente de asimetría de acuerdo a criterios de la **Tabla 4**.

#### 5.1.4.1 Prueba de normalidad

De acuerdo Nalbantis y Tsakiris (2008) la significación estadística del coeficiente de asimetría de los volúmenes de caudal acumulado se puso a prueba. Los autores concluyeron que el uso de los logaritmos naturales de volumen era necesario sólo para el periodo de referencia donde no cumpla la prueba de normalidad. Esto llevó a la utilización de la definición de la ecuación 4 para SDI de la serie evaluada, manteniendo la ecuación 3 para los otros períodos de referencia original. La prueba de normalidad se aplicó en esta investigación considerando los coeficientes de asimetría de la serie de datos iniciales y de los logaritmos naturales de la misma serie de datos iniciales.

La **Tabla 15** muestra el coeficiente de asimetría de las veintidós series de las estaciones hidrométricas evaluadas. De acuerdo con la prueba de Snedecor y Cochran (1967) los límites superiores críticos del valor absoluto del coeficiente de asimetría ( $|\hat{\gamma}|$ ) es igual a 0.87 y 0.587, respectivamente, a 0.02 y 0.10 nivel de significación. Por lo tanto, las series a considerar luego del test de normalidad fueron sombreadas de color verde.

Para 40 datos observados de las series hidrológicas analizadas y un nivel de significancia de  $\alpha= 0.01$  se tiene un valor crítico de asimetría ( $\gamma_{\alpha}(N)$ ) de 0.587, de aquí se desprende que los valores de  $|\hat{\gamma}| < \gamma_{\alpha}(N)$ , se acepta la hipótesis de normalidad.

La metodología para considerar una serie normal de acuerdo al test de normalidad del coeficiente de asimetría propuesto por Snedecor y Cochran (1967) muestra los siguientes resultados.

**Tabla 15: Coeficiente de asimetría de los caudales acumulados y de su logaritmo natural.**

	<b>Código</b>	<b>Base de cálculo</b>	<b>Avenida (dic-may)</b>	<b>Estiaje (jun-nov)</b>	<b>Año Hidrológico (sep-ago)</b>
<b>VP</b>	<b>E-TI</b>	Dato inicial	0.429	1.451	0.505
		Logaritmos	1.530	2.962	1.694
	<b>E-CI</b>	Dato inicial	0.190	0.040	0.163
		Logaritmos	0.776	0.978	0.781
	<b>P-ÑA</b>	Dato inicial	-1.374	-0.290	-0.496
		Logaritmos	2.294	3.593	2.318
	<b>PUC</b>	Dato inicial	-0.519	-0.554	0.985
		Logaritmos	4.839	0.664	4.512
	<b>RAC</b>	Dato inicial	-0.788	0.090	-0.711
		Logaritmos	0.093	0.971	0.043
	<b>S-DO</b>	Dato inicial	-0.172	-0.051	-0.083
		Logaritmos	0.704	0.771	0.805
	<b>CHO</b>	Dato inicial	-0.987	-0.580	-0.855
		Logaritmos	0.208	-0.020	-0.027
	<b>L-CA</b>	Dato inicial	-2.113	-0.170	-1.956
		Logaritmos	-0.049	0.527	-0.091
	<b>SOC</b>	Dato inicial	-0.345	0.093	-0.363
		Logaritmos	0.709	1.109	0.629
<b>CON</b>	Dato inicial	-1.646	-0.960	-1.613	
	Logaritmos	0.177	1.249	0.174	
<b>LET</b>	Dato inicial	-0.909	-1.184	-0.732	
	Logaritmos	0.682	0.323	0.525	
<b>HUAT</b>	Dato inicial	-0.268	0.290	-0.148	
	Logaritmos	0.845	1.285	0.843	
<b>VT</b>	<b>ILA</b>	Dato inicial	-0.904	-0.055	-0.580
		Logaritmos	1.044	0.854	1.111
	<b>HUAN</b>	Dato inicial	-0.245	-0.282	-0.160
		Logaritmos	0.546	0.638	0.595
	<b>RAM</b>	Dato inicial	-0.616	-0.021	-0.472
		Logaritmos	-0.002	1.103	0.062



<b>VA</b>	<b>K105</b>	Dato inicial	-0.316	0.106	-0.185
		Logaritmos	0.006	0.547	0.210
	<b>SHA</b>	Dato inicial	0.452	-0.422	0.680
		Logaritmos	0.854	0.055	1.103
	<b>BOR</b>	Dato inicial	-1.103	-0.568	-1.052
		Logaritmos	-0.723	-0.234	-0.782
	<b>CHA</b>	Dato inicial	0.198	0.139	0.687
		Logaritmos	0.850	0.588	1.465
	<b>S-RE</b>	Dato inicial	-0.223	-0.425	-0.154
		Logaritmos	-0.057	-0.211	0.005
	<b>REQ</b>	Dato inicial	-0.159	0.081	0.135
		Logaritmos	0.141	0.535	0.368
	<b>TAM</b>	Dato inicial	-0.216	-0.178	0.020
		Logaritmos	-0.017	0.166	0.243

FUENTE: Elaboración propia (2016)

#### 5.1.4.2 Cálculo del índice de sequía de caudales (SDI)

Luego de determinar las estaciones hidrométricas a normalizar, aplicando logaritmo natural al caudal acumulado de la serie según sea el periodo de evaluación (temporada avenidas, estiaje o año hidrológico) se procede a calcular el índice del SDI de acuerdo a las ecuaciones 3 y 4 según sea el caso evaluado previamente para las estaciones hidrométricas de las VP, VT y VA.

Los valores SDI positivos reflejan condiciones de no sequía mientras que los valores negativos indican una sequía hidrológica. En base al SDI, se definen cinco estados de sequía hidrológica indicados por un número entero que va de 0 (No sequía) a 4 (sequía extrema) se definen a través de los criterios de la **Tabla 3**.

Las **Tablas 16, 17 y 18** describen los estados de sequía hidrológica asociados a una coloración. Verde claro para un estado de no sequía, amarillo para un estado de sequía leve, color oro para el estado de sequía moderada, naranja para el estado de sequía severa y rojo para el estado de sequía extrema.

Tabla 16: Estados del SDI de las estaciones evaluadas en la temporada de avenidas.

AÑO H.	TEMPORADA DE AVENIDA / PERIODO DIC-MAY																					
	VP												VT			VA						
	E-TI	E-CI	P-NA	PUC	RAC	S-DO	CHO	L-CA	SOC	CON	LET	HUAT	ILA	HUAN	RAM	K105	SHA	BOR	CHA	S-RE	REQ	TAM
1973-1974	1	0	1	1	1	0	1	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	
1974-1975	0	0	1	0	0	1	1	0	1	0	1	0	0	0	0	1	3	0	4	0	0	0
1975-1976	0	0	0	0	1	1	0	0	0	0	0	0	0	0	1	0	0	0	0	0	0	
1976-1977	0	1	1	0	1	1	1	0	1	1	1	1	1	1	1	1	3	2	0	2	0	0
1977-1978	1	2	1	1	2	2	1	1	1	2	3	1	0	1	0	0	0	0	0	0	0	
1978-1979	1	1	1	1	1	1	0	1	1	1	1	1	1	1	0	0	2	0	2	0	0	
1979-1980	2	1	1	1	3	2	2	2	3	2	2	1	1	1	1	1	0	3	0	4	4	4
1980-1981	1	1	1	1	1	0	0	0	0	1	0	0	0	0	0	0	1	0	1	0	0	
1981-1982	1	2	1	1	1	0	1	0	1	0	1	0	1	0	0	0	0	0	0	0	0	
1982-1983	0	0	0	0	0	0	0	1	1	2	1	2	3	2	4	2	1	0	1	0	0	
1983-1984	0	0	0	1	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	
1984-1985	1	2	1	1	3	0	0	0	0	1	0	0	0	0	0	0	0	1	0	1	1	
1985-1986	1	1	1	1	1	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	1	1	1	1	0	
1986-1987	1	1	0	1	1	0	0	1	0	0	1	1	0	1	1	2	1	0	1	0	0	
1987-1988	1	1	1	1	1	2	1	1	1	1	0	1	1	0	0	0	0	0	1	0	1	
1988-1989	0	0	0	1	0	1	1	0	0	0	2	0	1	1	0	1	1	0	1	0	1	
1989-1990	1	1	1	1	3	2	4	4	3	4	4	3	2	3	4	3	1	1	1	2	3	2
1990-1991	1	1	1	1	1	1	2	1	0	1	2	1	1	1	2	1	1	1	1	0	0	
1991-1992	0	1	1	1	2	2	4	4	2	4	4	1	2	1	2	3	0	4	0	4	0	4
1992-1993	0	0	1	1	0	1	1	0	0	0	1	1	1	1	1	1	1	1	1	0	0	0
1993-1994	0	0	1	1	0	0	0	0	0	0	0	0	1	0	0	0	0	0	0	0	0	0
1994-1995	1	1	1	1	1	2	2	2	0	2	1	1	1	1	1	1	1	2	1	2	0	2
1995-1996	1	1	1	1	0	0	0	1	0	1	0	1	1	2	1	1	0	4	0	1	0	1
1996-1997	0	2	1	1	2	1	2	2	2	1	1	1	0	0	0	0	1	1	1	1	1	1
1997-1998	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	2	1	1	2	0	0	0	1	1	0
1998-1999	0	0	0	0	0	1	0	0	1	0	1	0	0	1	1	1	0	0	0	0	0	0
1999-2000	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	1	1	0	1	0	1	1	1	1
2000-2001	1	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	1	0	1	1	1
2001-2002	0	0	0	0	0	1	0	0	0	0	0	0	1	0	0	0	1	0	1	0	1	1
2002-2003	1	1	1	1	1	0	0	0	0	0	0	0	1	0	0	0	1	0	1	1	1	1
2003-2004	1	1	1	1	2	2	1	0	2	0	2	1	1	0	0	0	1	2	2	1	2	2
2004-2005	1	1	1	1	1	1	1	0	1	0	1	2	2	1	1	1	1	0	1	1	2	1
2005-2006	1	0	1	1	0	1	0	0	0	0	0	0	0	1	1	0	1	2	1	1	1	1
2006-2007	1	1	1	1	0	1	0	0	0	0	0	1	1	1	0	0	0	1	0	1	1	0
2007-2008	0	0	0	0	0	1	1	0	1	0	0	2	1	2	2	2	0	0	0	1	1	1
2008-2009	0	0	0	0	0	1	0	0	1	0	0	2	2	2	1	2	0	0	0	0	2	0
2009-2010	1	1	0	1	0	1	0	0	1	0	0	2	1	1	1	0	3	0	1	1	3	1
2010-2011	1	1	1	1	1	1	0	0	1	0	0	0	0	1	0	0	2	3	1	3	2	2
2011-2012	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	1	0
2012-2013	1	1	1	1	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	1	0

FUENTE: Elaboración propia (2016)

Tabla 17: Estados del SDI de las estaciones evaluadas en la temporada de estiaje.

AÑO H.	TEMPORADA DE ESTIAJE / PERIODO JUN-NOV																					
	VP												VT			VA						
	E-TI	E-CI	P-NA	PUC	RAC	S-DO	CHO	L-CA	SOC	CON	LET	HUAT	ILA	HUAN	RAM	K105	SHA	BOR	CHA	S-RE	REQ	TAM
1973-1974	1	0	1	0	0	1	4	1	1	0	1	0	0	0	0	1	1	0	2	0	0	0
1974-1975	0	0	1	0	0	1	0	1	1	0	1	0	0	1	1	2	0	0	0	0	0	0
1975-1976	0	0	1	0	1	1	1	1	1	0	1	0	0	1	1	2	0	0	0	0	0	0
1976-1977	1	1	1	0	1	1	1	1	0	0	1	0	0	1	1	2	1	0	1	0	0	0
1977-1978	1	1	1	0	1	1	1	1	0	1	2	2	0	1	1	2	0	0	0	0	0	0
1978-1979	1	2	1	1	1	2	1	2	1	1	3	1	0	1	0	1	1	1	1	1	1	1
1979-1980	1	1	1	0	1	0	1	1	0	2	3	1	1	1	1	1	0	1	0	1	0	1
1980-1981	1	2	1	1	0	0	1	1	1	0	2	0	0	0	0	0	1	1	0	0	0	0
1981-1982	0	1	1	1	0	0	0	0	0	0	1	0	0	0	1	0	0	0	0	0	0	0
1982-1983	0	0	0	0	1	0	0	1	1	2	4	1	2	2	0	2	0	1	0	1	1	1
1983-1984	0	1	1	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	4	0	2	0	0	0	0
1984-1985	1	2	1	1	2	0	0	1	0	0	1	1	0	0	2	0	0	1	0	1	0	0
1985-1986	1	1	1	1	0	0	0	1	0	0	0	1	0	0	0	1	0	2	0	0	0	0
1986-1987	0	1	1	2	1	1	1	1	2	1	3	2	0	1	0	1	0	1	0	1	1	1
1987-1988	1	2	1	2	0	1	2	1	1	2	1	0	0	1	1	2	0	4	0	2	1	2
1988-1989	1	1	1	1	0	1	2	1	0	1	1	0	0	1	0	2	0	0	0	0	0	0
1989-1990	1	1	1	0	0	0	4	2	1	2	1	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
1990-1991	1	1	1	3	2	1	2	1	1	1	0	0	0	0	1	1	0	1	0	1	0	1
1991-1992	0	1	1	1	1	3	4	3	3	2	0	1	2	1	3	0	3	1	2	1	0	1
1992-1993	0	0	1	1	0	1	1	0	0	1	0	1	0	0	0	0	1	0	1	0	0	0
1993-1994	1	0	1	1	1	1	0	0	0	1	0	1	1	0	1	1	1	0	1	0	0	0
1994-1995	0	2	1	2	1	2	1	1	1	2	0	0	1	1	1	1	0	3	0	3	2	3
1995-1996	0	2	1	1	1	2	0	2	1	2	0	0	1	1	2	1	2	3	1	1	1	1
1996-1997	0	2	1	2	3	2	1	0	2	1	0	0	2	0	0	0	1	2	1	3	1	1
1997-1998	1	0	0	0	1	1	0	0	1	0	0	1	2	1	1	1	1	2	1	3	1	2
1998-1999	0	0	0	0	0	1	0	0	1	0	0	1	1	1	1	1	1	1	0	1	0	0
1999-2000	0	0	0	0	0	0	0	0	1	0	0	1	1	1	1	1	0	1	0	0	1	0
2000-2001	1	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	1	0	0	1	0	1	1	1	0	1	1
2001-2002	1	0	1	0	0	0	0	0	0	0	0	1	0	0	0	0	1	0	1	0	1	0
2002-2003	1	1	1	1	1	1	0	1	1	2	0	1	1	0	0	0	1	0	0	0	1	0
2003-2004	1	1	1	1	0	1	0	0	1	1	0	0	0	0	1	0	1	0	1	0	1	0
2004-2005	1	2	1	2	1	1	0	2	1	2	0	1	1	1	1	0	1	0	1	2	2	3
2005-2006	1	1	1	1	1	1	1	0	0	0	0	0	1	0	1	0	2	1	2	2	1	2
2006-2007	1	1	1	0	0	0	1	0	1	1	0	1	1	0	1	1	0	0	1	1	1	1
2007-2008	0	0	0	0	0	1	0	0	2	0	1	3	2	3	1	1	0	0	1	1	1	1
2008-2009	1	0	1	0	1	0	0	0	0	0	0	3	2	1	0	0	2	0	1	0	1	0
2009-2010	1	1	1	1	2	0	0	1	1	0	1	1	2	3	3	1	1	4	2	4	3	4
2010-2011	1	1	0	1	2	0	0	1	0	0	0	1	1	1	1	0	0	0	1	1	1	1
2011-2012	0	0	0	1	1	0	0	0	0	0	0	0	1	1	1	1	1	0	2	1	2	1
2012-2013	1	1	1	0	0	0	0	1	0	0	0	0	1	0	0	0	0	0	1	0	1	0

FUENTE: Elaboración propia (2016)

Tabla 18: Estados del SDI de las estaciones evaluadas en la temporada del año hidrológico.

AÑO H.	TEMPORADA DE AÑO HIDROLOGICO / PERIODO SEP-AGO																					
	VP												VT			VA						
	E-TI	E-CI	P-NA	PUC	RAC	S-DO	CHO	L-CA	SOC	CON	LET	HUAT	ILA	HUAN	RAM	K105	SHA	BOR	CHA	S-RE	REQ	TAM
1973-1974	1	0	1	1	0	0	2	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	
1974-1975	0	0	1	0	0	1	1	0	1	0	1	0	0	0	0	1	3	0	3	0	0	0
1975-1976	0	0	1	0	0	1	0	0	0	0	0	0	0	0	0	1	0	0	0	0	0	0
1976-1977	0	1	1	0	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	3	1	0	1	0	0	0
1977-1978	1	1	1	1	2	1	1	1	1	1	3	1	0	0	0	1	0	0	0	0	0	0
1978-1979	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	0	1	0	2	0	0	0
1979-1980	2	1	1	1	4	2	2	2	3	2	3	1	1	1	1	1	0	3	0	3	2	3
1980-1981	1	1	1	1	1	0	0	0	0	1	0	0	0	0	0	0	1	0	1	0	0	0
1981-1982	1	2	1	1	1	0	0	0	1	1	1	1	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
1982-1983	0	0	0	0	0	0	0	1	1	1	1	2	2	2	4	1	1	0	1	0	0	0
1983-1984	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	1	0	0	0	0	0
1984-1985	1	2	1	1	3	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	1	0	1	0	1	1
1985-1986	1	1	1	1	1	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	1	1	0	0	0	0	0
1986-1987	1	1	0	1	1	0	0	1	0	0	1	1	0	0	1	2	0	0	0	0	0	0
1987-1988	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	0	1	0	0	0	0	1	0	1	0	1	1
1988-1989	0	0	0	1	0	1	1	0	0	0	2	0	0	1	0	1	1	0	1	0	0	0
1989-1990	1	1	1	1	2	2	4	4	3	4	4	3	2	4	4	3	0	0	1	1	1	1
1990-1991	1	1	1	1	1	1	2	2	0	1	1	1	1	1	2	1	0	1	0	1	0	1
1991-1992	0	1	1	1	2	2	4	4	3	4	3	1	2	1	3	3	0	4	0	3	0	3
1992-1993	0	0	1	1	0	2	1	0	0	0	1	1	1	1	1	1	2	1	2	0	0	0
1993-1994	0	0	1	1	0	0	0	0	0	0	0	0	1	0	0	0	0	0	0	0	0	0
1994-1995	1	1	1	1	2	2	1	2	1	2	1	1	1	1	1	1	0	3	0	2	1	2
1995-1996	1	1	1	1	0	0	0	1	0	1	0	0	1	2	2	1	0	4	0	2	1	2
1996-1997	0	2	1	1	3	2	2	2	2	2	2	1	0	0	0	0	1	2	1	2	1	1
1997-1998	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	1	2	1	1	2	1	0	1	2	1	1
1998-1999	0	0	0	0	0	1	0	0	1	0	1	0	0	1	1	1	0	0	0	0	0	0
1999-2000	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	1	1	0	1	0	1	0	1	1
2000-2001	1	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	1	1	1	1	1	1
2001-2002	1	0	0	0	0	1	0	0	0	0	0	0	1	0	0	0	1	0	1	0	1	1
2002-2003	1	1	1	1	1	0	0	0	0	0	0	0	1	0	0	0	1	1	1	1	1	0
2003-2004	1	1	1	1	3	2	1	0	2	0	1	1	1	0	0	0	1	0	1	1	2	1
2004-2005	1	1	1	1	0	1	0	0	1	0	1	2	2	1	1	1	2	0	1	1	2	1
2005-2006	1	0	1	1	0	1	0	0	0	0	0	0	0	0	1	0	2	1	2	1	2	2
2006-2007	1	1	1	1	0	1	0	0	0	0	0	0	1	0	0	0	1	1	1	2	1	1
2007-2008	0	0	0	0	0	1	1	0	1	0	0	2	1	2	2	2	0	0	0	1	1	1
2008-2009	0	0	0	0	0	1	0	0	1	0	0	2	2	2	1	2	1	0	0	0	2	0
2009-2010	1	1	1	1	0	1	0	0	1	0	0	2	1	2	2	0	3	0	1	2	2	2
2010-2011	1	1	0	1	1	0	0	0	1	0	0	0	0	1	0	0	1	3	2	3	2	2
2011-2012	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	1	0	1	0
2012-2013	1	1	1	1	0	0	0	0	0	0	0	0	1	0	0	0	0	0	0	0	2	0

FUENTE: Elaboración propia (2016)

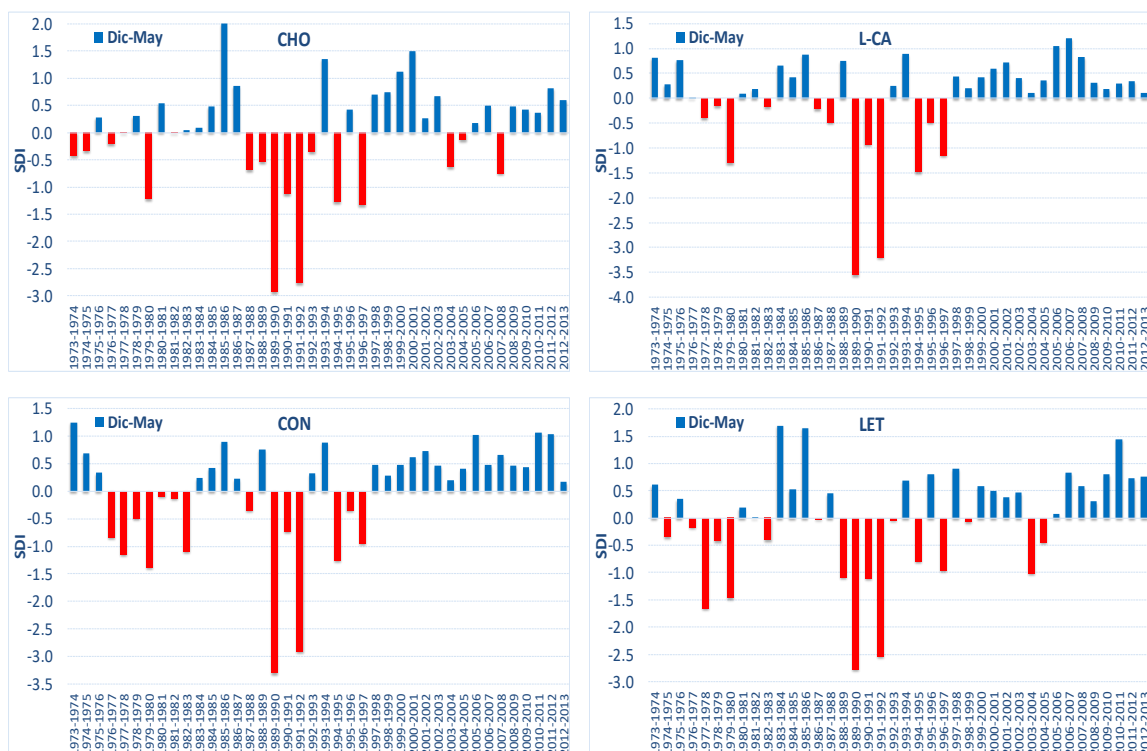
### 5.1.4.3 Duración

La duración es el tiempo en meses o años consecutivos durante el cual los caudales registrados en las estaciones hidrométricas son inferiores al caudal medio para un mismo período analizado. La caracterización del parámetro duración de la sequía hidrológica se realizó en una gráfica de evolución temporal del SDI definiendo los umbrales (barras de color roja) que den inicio y término a un evento de sequía hidrológica.

La caracterización de la sequía hidrológica esta función de su magnitud, duración y extensión. Los umbrales de los estados de sequía se han descritos en la **Tabla 3**.

La **Tabla 16** muestra los índices de sequía hidrológica (SDI) para la temporada de avenidas (diciembre-mayo) del periodo de evaluación (1973-2013), donde se obtienen gráficamente representada en las **Figuras 15, 16 y 17**.

La **Figura 15** muestra en la VP las series del SDI con condiciones de sequía hidrológica extrema en la región VP-ZC en las estaciones hidrométricas CHO (Chosica), L-CA (La Capilla) y en la región VP-ZS en las estaciones hidrométricas CON (Conta) y LET (Letrayoc) en los años hidrológicos 1989-1990 y 1991-1992.

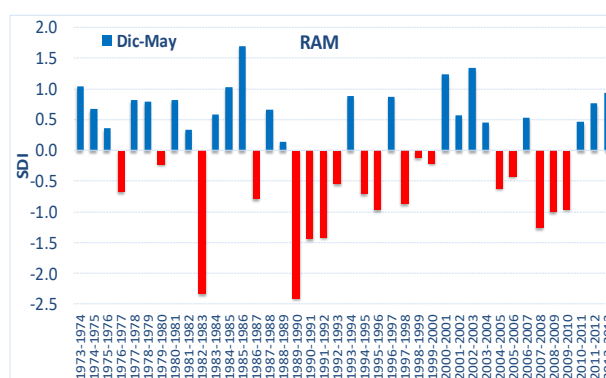


**Figura 15:** Serie SDI periodo de avenidas de la VP.

FUENTE: Elaboración Propia (2016)

Además muestra que las series del SDI de las estaciones hidrométricas CHO (Chosica) y L-CA (La Capilla) con una duración máxima de seis y tres temporadas consecutivas de sequía respectivamente entre los años 1987 y 1992 ubicados en la región VP-ZC. Mientras que las estaciones hidrométricas CON (Conta) y LET (Letrayoc) registraron una duración máxima de siete y cinco temporadas consecutivas de sequía respectivamente entre los años 1976 a 1983 y 1988 a 1993.

La **Figura 16** muestra en la VT las series de SDI con condiciones de sequía hidrológica extrema en la estación hidrométrica RAM (Ramis) en los años hidrológicos 1982-1983 y 1989-1990. Con una duración máxima registrada de cuatro temporadas consecutivas de sequía hidrológica entre los años 1989 a 1993.

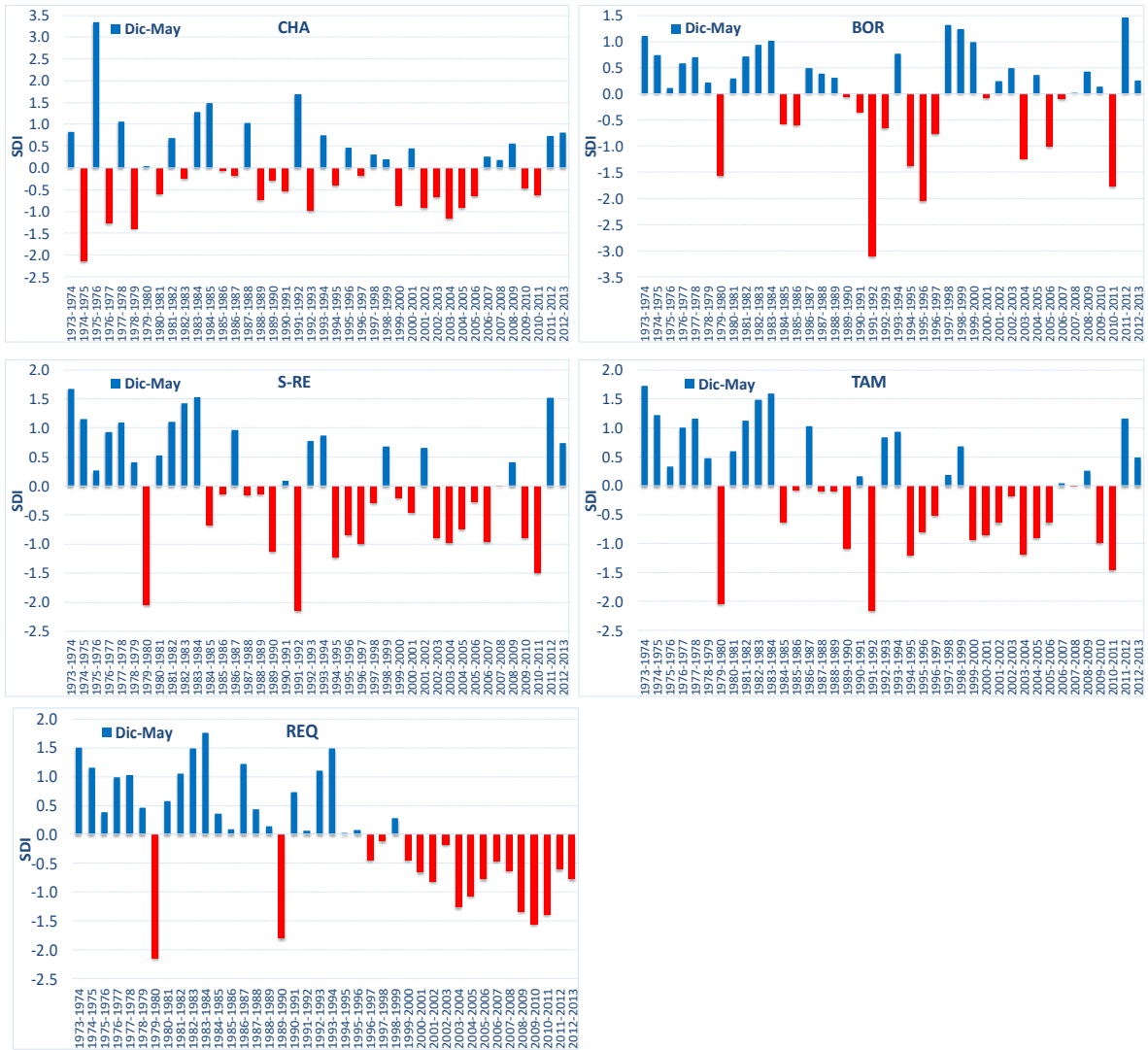


**Figura 16: Serie SDI periodo de avenidas de la VT.**

FUENTE: Elaboración Propia (2016)

La **Figura 17** muestra en la VA las series del SDI con condiciones de sequía hidrológica extrema en las estaciones hidrométricas de CHA (Chazuta) en el año hidrológico 1974-1975, en S-RE (San Regis) y TAM (Tamishiyacu) en 1979-1980 y en 1991-1992, REQ (Requena) en 1979-1980, y BOR (Borja) en 1991-1992 y 1995-1996.

Asimismo, muestra las series de SDI de las estaciones hidrométricas de CHA (Chazuta), TAM (Tamishiyacu), REQ (Requena), BOR (Borja) y S-RE (San Regis) con unas duraciones máximas registradas de cinco, siete, catorce, cuatro y seis temporadas consecutivas de sequía hidrológica entre los años 2001 a 2006, 1999 a 2006, 1999 a 2013, 1989 a 1993 y 2002 a 2008 respectivamente.

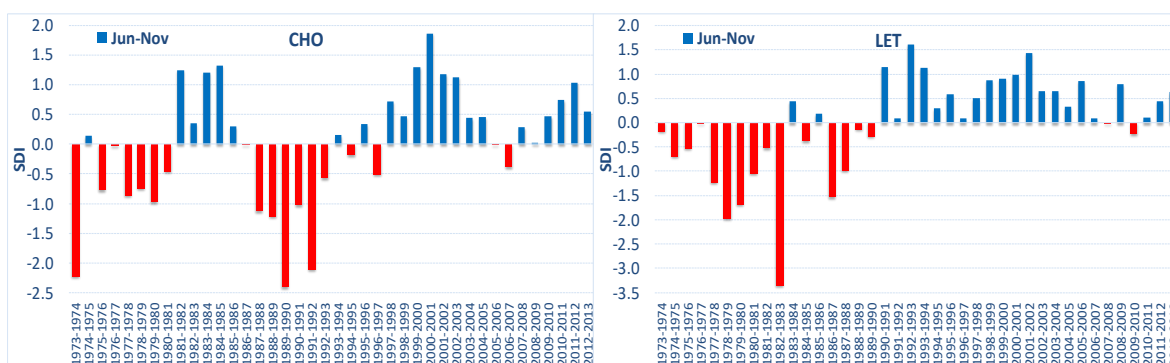


**Figura 17: Serie SDI periodo de avenidas de la VA.**

FUENTE: Elaboración Propia (2016)

La **Tabla 17** muestra los índices de sequía hidrológica (SDI) para la temporada de estiaje (junio-noviembre) del periodo de evaluación (1973-2013), donde se obtiene gráficamente representadas en las **Figuras 18 y 19**.

La **Figura 18** muestra en la VP las series SDI con condiciones de sequía hidrológica extrema en las estaciones hidrométricas CHO (Chosica) en los años hidrológicos 1973-1974, 1989-1990 y 1991-1992, y en LET (Letrayoc) en 1982-1983. Con unas duraciones máximas registradas de siete y diez temporadas consecutivas de sequía hidrológica entre los años 1986 a 1993 y 1973 a 1983 respectivamente.



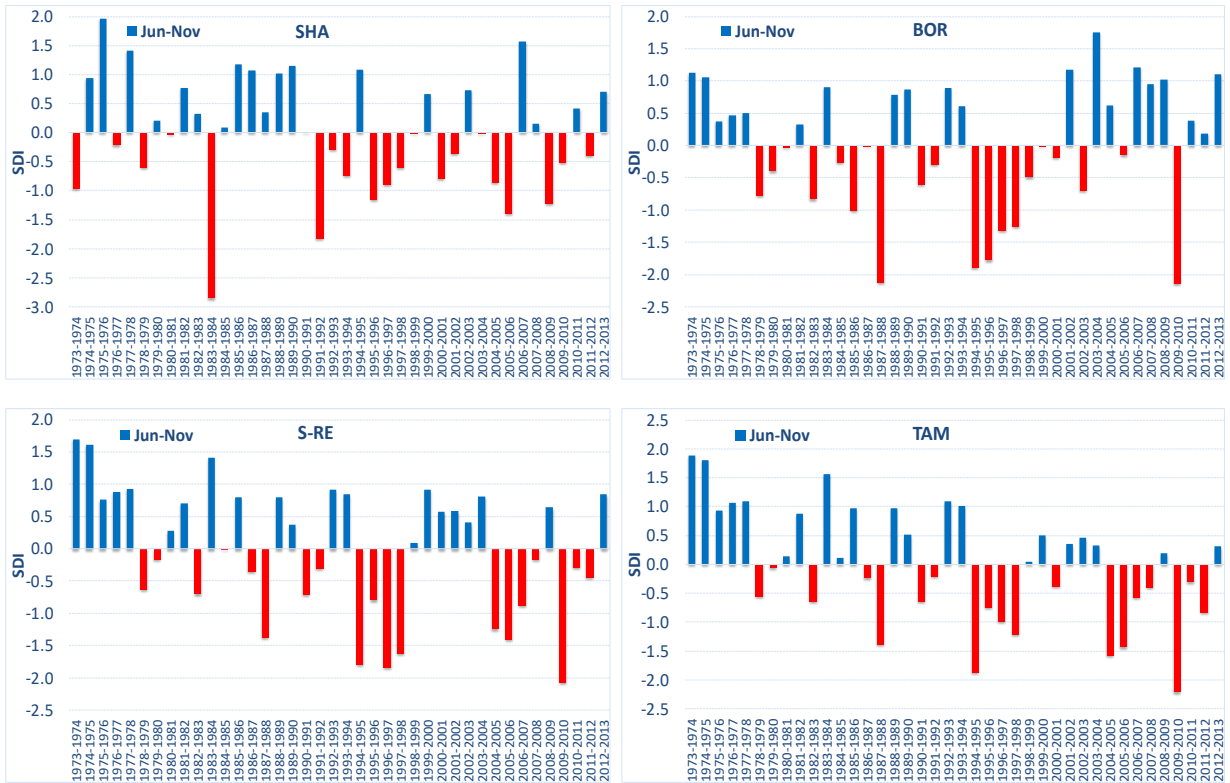
**Figura 18: Serie SDI periodo de estiaje de la VP.**

FUENTE: Elaboración Propia (2016)

En la VT no se detectaron condiciones de sequía hidrológica extrema para la temporada de estiaje.



La **Figura 19** muestra en la VA las series de SDI con condiciones de sequía hidrológica extrema en las estaciones hidrométricas de SHA (Shanao) en el año hidrológico de 1983-1984, BOR (Borja) en 1987-1988 y 2009-2010, S-RE (San Regis) y TAM (Tamishiyacu) en 2009-2010.



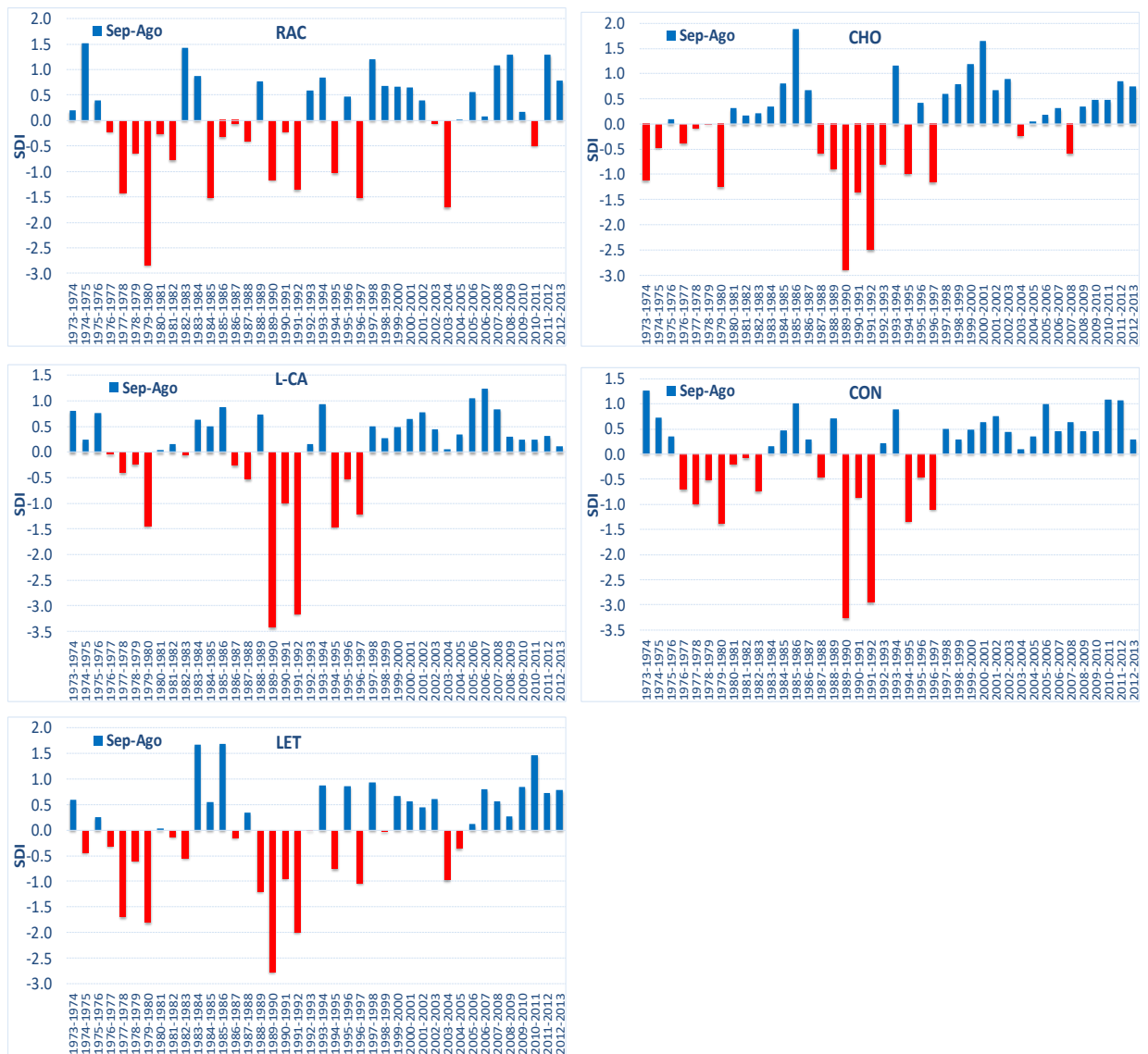
**Figura 19: Serie SDI periodo de estiaje de la VA.**

FUENTE: Elaboración Propia (2016)

Además muestra las series de SDI de las estaciones hidrométricas de SHA (Shanao), BOR (Borja), S-RE (San Regis) y TAM (Tamishiyacu), con unas duraciones máximas registradas de cuatro, siete, cuatro y cuatro temporadas consecutivas de sequía hidrológica entre los años 1995 a 1999, 1994 a 2001, 1994 a 1998 y 2004 a 2008 respectivamente.

La **Tabla 18** muestra los índices de sequía hidrológica (SDI) para la temporada de todo el año hidrológico (septiembre-agosto) del periodo de evaluación (1973-2013), donde se obtiene gráficamente representadas en las **Figuras 18, 19 y 20**.

La **Figura 20** muestra en la VP las series SDI con condiciones de sequía hidrológica extrema en las estaciones hidrométricas RAC (Racarrumi) en el año hidrológico 1979-1980, CHO (Chosica), L-CA (La Capilla) y CON (Conta) en 1989-1990 y 1991-1992, y LET (Letrayoc) en 1989-1990.

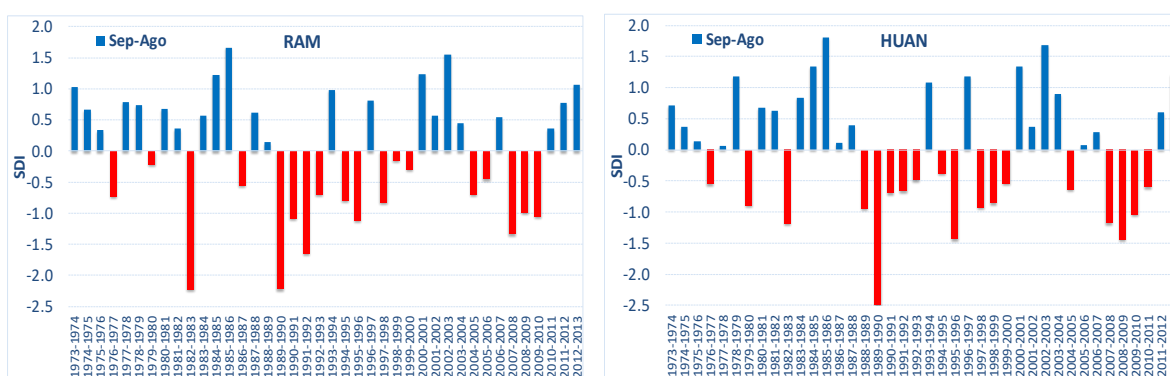


**Figura 20: Serie SDI periodo del año hidrológico de la VP.**

FUENTE: Elaboración Propia (2016)

Además muestra las series SDI de las estaciones hidrométricas RAC (Racarrumi), CHO (Chosica), L-CA (La Capilla), CON (Conta) y LET (Letrayoc), con unas duraciones máximas registradas de seis, seis, cuatro, siete y cinco temporadas consecutivas de sequía hidrológica entre los años 1976 a 1982, 1987 a 1993, 1976 a 1980, 1976 a 1983, 1988 a 1993 respectivamente.

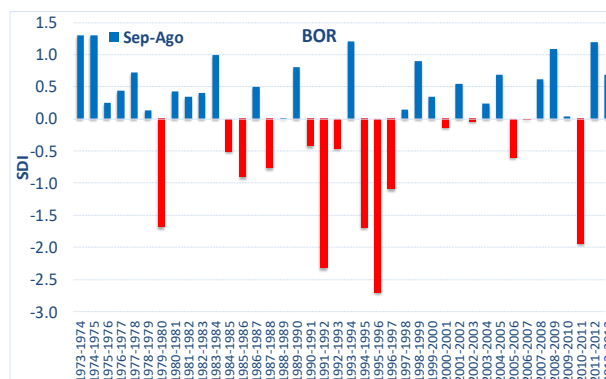
La **Figura 21** muestra en la VT las series del SDI con condiciones de sequía hidrológica extrema en la estación hidrométrica RAM (Ramis) en el año hidrológico 1982-1983 y 1989-1990, y HUAN (Huancané) en 1989-1990, con unas duraciones máximas registradas de cuatro y cinco temporadas consecutivas de sequía hidrológica entre los años 1989 a 1993 y 1988 a 1993 respectivamente.



**Figura 21: Serie SDI periodo del año hidrológico de la VT.**

FUENTE: Elaboración Propia (2016)

La **Figura 22** muestra en la VA las series de SDI con condiciones de sequía hidrológica extrema en la estación hidrométrica BOR (Borja) en 1991-1992 y 1995-1996, con una duración máxima registrada de tres temporadas consecutivas de sequía hidrológica entre los años 1994 a 1996.



**Figura 22: Serie SDI periodo del año hidrológico de la VA.**

FUENTE: Elaboración Propia (2016)

#### 5.1.4.4 Análisis de frecuencia

Del índice de sequía de caudales calculado de las veintidós estaciones hidrométricas para la serie de tiempo de cuarenta años (1973-2013) en los periodos de avenidas (diciembre-mayo), estiaje (junio-noviembre) y año hidrológico (septiembre-agosto), se estima la frecuencia por cada evento ocurrido esa serie de tiempo, de esta manera se identifican distintos los eventos acontecido de acuerdo a la magnitud de la sequía hidrológica, dichos eventos se produjeron en una frecuencia dada según el registro histórico tal cual se describe en la **Tabla 19**.

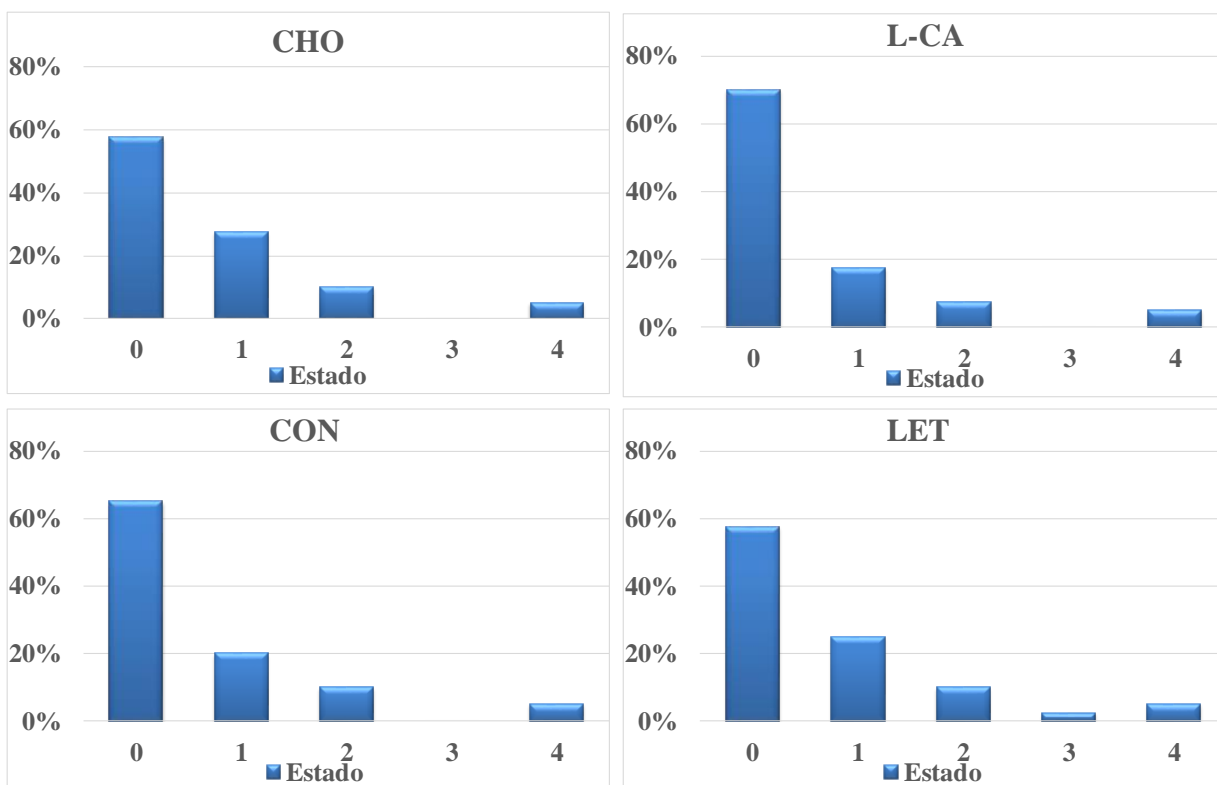
**Tabla 19: Frecuencia de eventos de sequía hidrológica en la en temporada de avenidas.**

	Código	Estación	No Sequía	Sequía Leve	Sequía Moderada	Sequía Severa	Sequía Extrema
VP	E-TI	El Tigre	17	22	1	0	0
	E-CI	El Ciruelo	17	19	4	0	0
	P-ÑA	Puente Ñacara	14	26	0	0	0
	PUC	Puchaca	12	28	0	0	0
	RAC	Racarrumi	19	14	4	3	0
	S-DO	Santo Domingo	16	17	7	0	0
	CHO	Chosica	23	11	4	0	2
	L-CA	La Capilla	28	7	3	0	2
	SOC	Socsi	21	14	3	2	0
	CON	Conta	26	8	4	0	2
	LET	Letrayoc	23	10	4	1	2
	HUAT	Huatiapa	18	15	6	1	0
VT	ILA	Ilave	18	16	5	1	0
	HUAN	Huancané	17	18	4	1	0
	RAM	Ramis	22	13	3	0	2
VA	K105	Km-105	23	9	5	3	0
	SHA	Shanao	19	16	3	2	0
	BOR	Borja	25	8	3	2	2
	CHA	Chazuta	19	17	3	0	1
	S-RE	San Regis	19	16	2	1	2
	REQ	Requena	22	11	4	2	1
	TAM	Tamishiyacu	20	14	4	0	2

FUENTE: Elaboración propia (2016)

Además muestra los eventos de sequía hidrológica ocurridos en la temporada de avenidas (diciembre-mayo) para el periodo de evaluación (1973-2013) de acuerdo a los resultados del índice de sequía hidrológica (SDI).

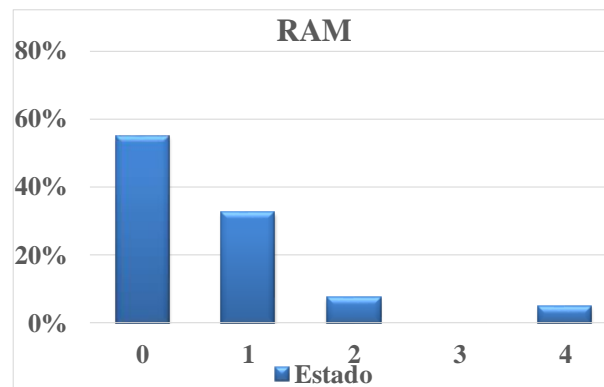
La **Figura 23** muestra en la VP dos eventos de sequía hidrológica extrema (estado 4) en las estaciones hidrométricas CHO (Chosica), L-CA (La Capilla), CON (Conta) y LET (Letrayoc) equivalente al 5% del total de eventos evaluados.



**Figura 23: Frecuencia de eventos de sequía hidrológica en el periodo de avenidas de la VP.**

FUENTE: Elaboración Propia (2016)

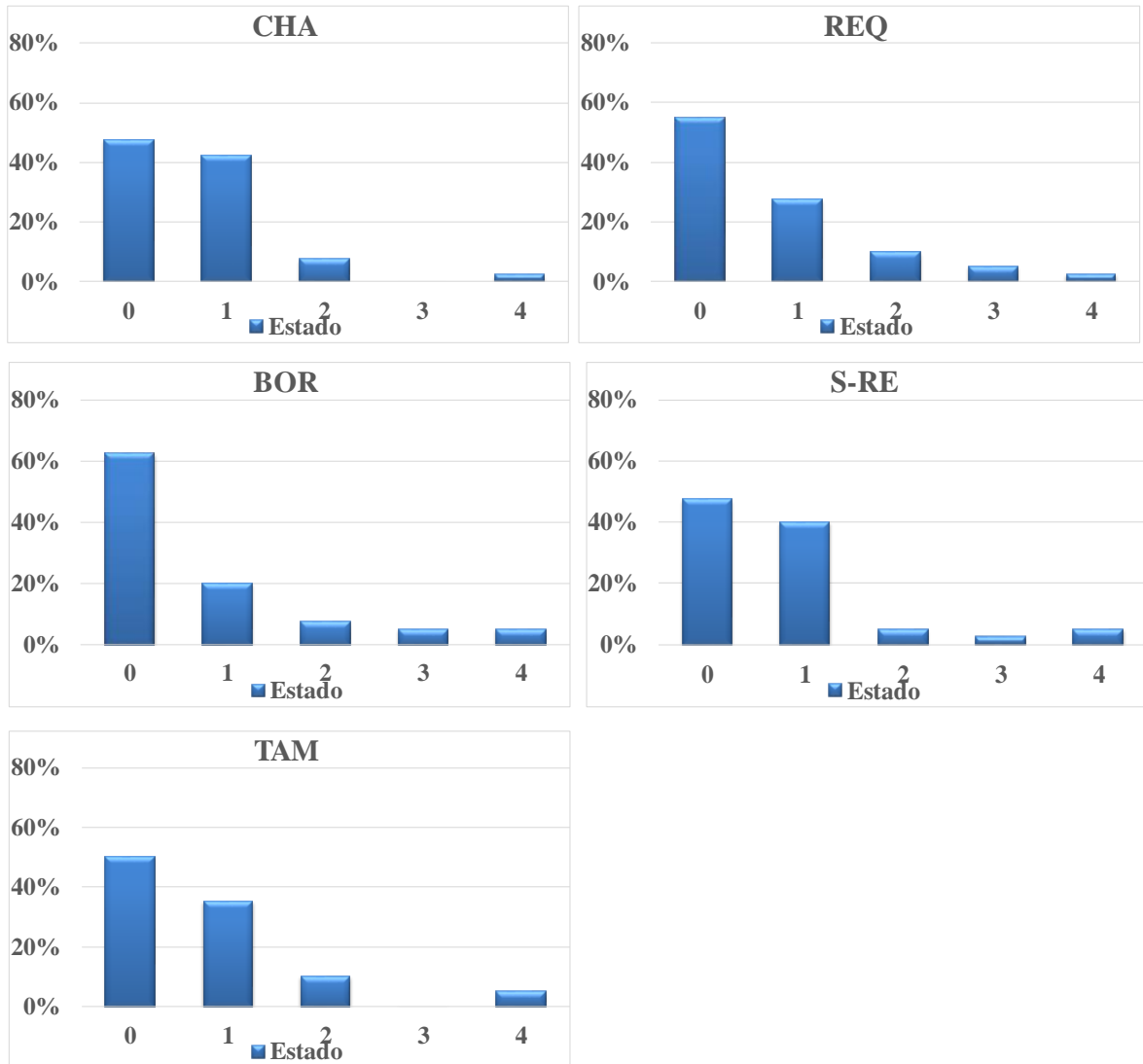
La **Figura 24** muestra en la VT dos eventos de sequía hidrológica extrema en la estación hidrométrica RAM (Ramis) equivalente al 5% del total de eventos evaluados.



**Figura 24: Frecuencia de eventos de sequía hidrológica en el periodo de avenidas de la VT.**

FUENTE: Elaboración Propia (2016)

La **Figura 25** muestra en la VA un evento de sequía hidrológica extrema en las estaciones hidrométricas de CHA (Chazuta) y REQ (Requena) equivalente al 2.5% del total de eventos evaluados, y dos eventos de sequía hidrológica en las estaciones hidrométricas de BOR (Borja), S-RE (San Regis) TAM (Tamishiyacu) equivalente al 5% del total de eventos evaluados.



**Figura 25: Frecuencia de eventos de sequía hidrológica en el periodo de avenidas de la VA.**

FUENTE: Elaboración propia (2016)

**Tabla 20: Frecuencia de eventos de sequía hidrológica en temporada de estiaje.**

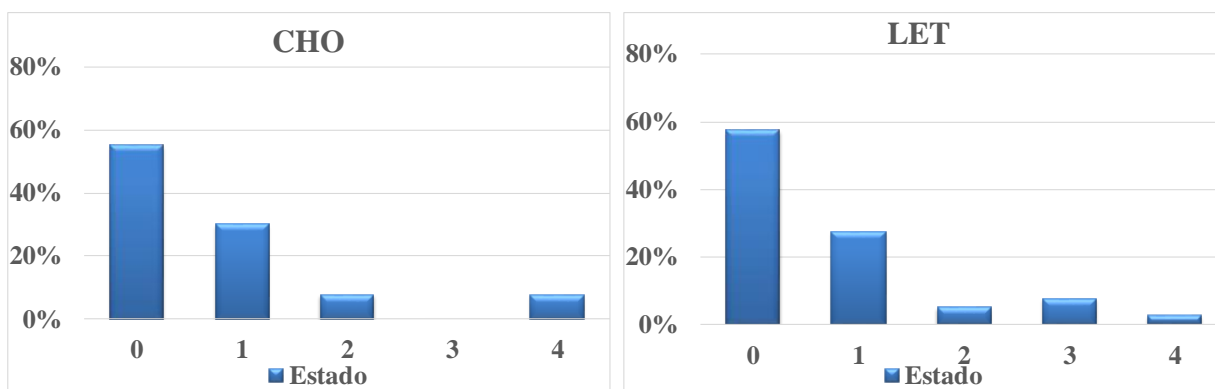
	Código	Estación	No Sequía	Sequía Leve	Sequía Moderada	Sequía Severa	Sequía Extrema
<b>VP</b>	E-TI	El Tigre	15	25	0	0	0
	E-CI	El Ciruelo	14	18	8	0	0
	P-ÑA	Puente Ñacara	8	32	0	0	0
	PUC	Puchaca	18	16	5	1	0
	RAC	Racarrumi	18	17	4	1	0
	S-DO	Santo Domingo	17	18	4	1	0
	CHO	Chosica	22	12	3	0	3
	L-CA	La Capilla	16	19	4	1	0
	SOC	Socsi	17	19	3	1	0
	CON	Conta	21	10	9	0	0
	LET	Letrayoc	23	11	2	3	1
	HUAT	Huatiapa	18	18	2	2	0
	<b>VT</b>	ILA	Ilave	20	13	7	0
HUAN		Huancané	18	19	1	2	0
RAM		Ramis	15	21	2	2	0
<b>VA</b>	K105	Km-105	17	16	7	0	0
	SHA	Shanao	20	15	3	1	1
	BOR	Borja	20	13	3	2	2
	CHA	Chazuta	17	17	6	0	0
	S-RE	San Regis	21	12	3	3	1
	REQ	Requena	17	19	3	1	0
	TAM	Tamishiyacu	21	13	3	2	1

FUENTE: Elaboración propia (2016)



De acuerdo a la **Tabla 20**, donde se muestran los eventos de sequía hidrológica ocurridos en la temporada de estiaje (junio-noviembre) para el periodo de evaluación (1973-2013) de acuerdo a los resultados del índice de sequía hidrológica (SDI). Donde se obtiene gráficamente representadas en las **Figuras 26 y 27**.

La **Figura 26** muestra en la VP un evento de sequía hidrológica extrema en la estación hidrométrica de LET (Letrayoc) equivalente al 2.5% del total de eventos evaluados, y tres eventos de sequía hidrológica extrema en la estación hidrométrica CHO (Chosica) equivalente al 5% del total de eventos evaluados.

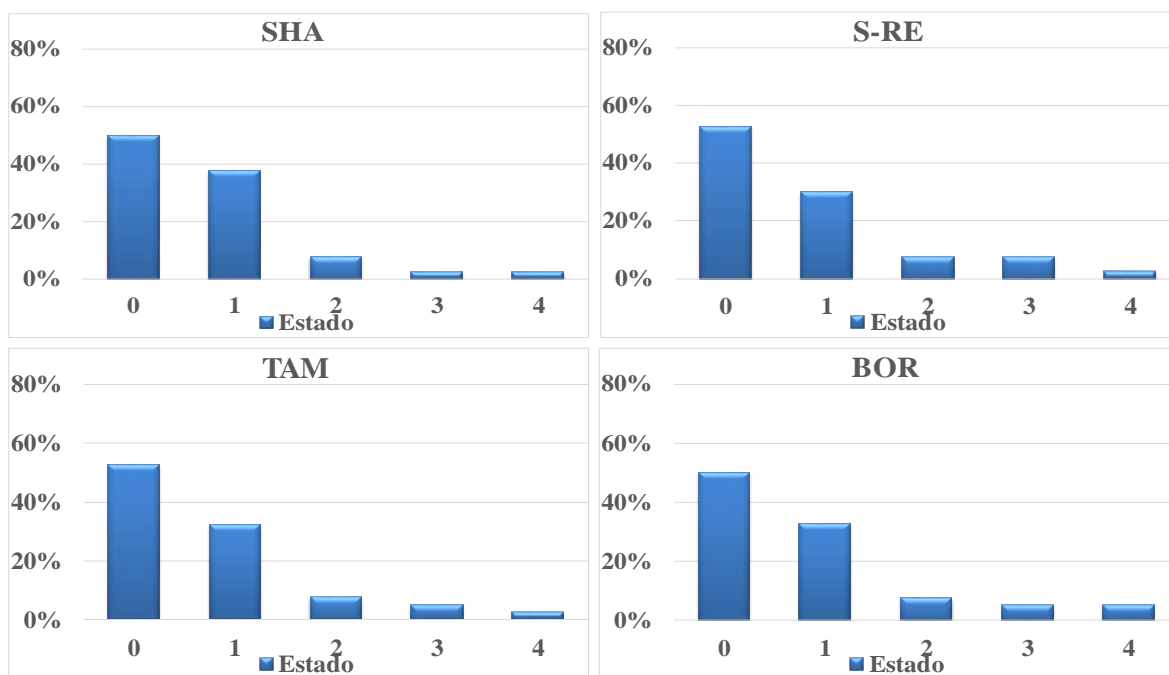


**Figura 26: Frecuencia de eventos de sequía hidrológica en el periodo de estiaje de la VP.**

FUENTE: Elaboración propia (2016)

En la VT no se detectaron condiciones de sequía hidrológica extrema para la temporada de estiaje.

La **Figura 27** muestra en la VA un evento de sequía hidrológica extrema en las estaciones hidrométricas de SHA (Shanao), S-RE (San Regis) y TAM (Tamishiyacu) equivalente al 2.5% del total de eventos evaluados, y dos eventos de sequía hidrológica extrema en la estación hidrométrica BOR (Borja) equivalente al 5% del total de eventos evaluados.



**Figura 27: Frecuencia de eventos de sequía hidrológica en el periodo de estiaje de la VA.**

FUENTE: Elaboración propia (2016)

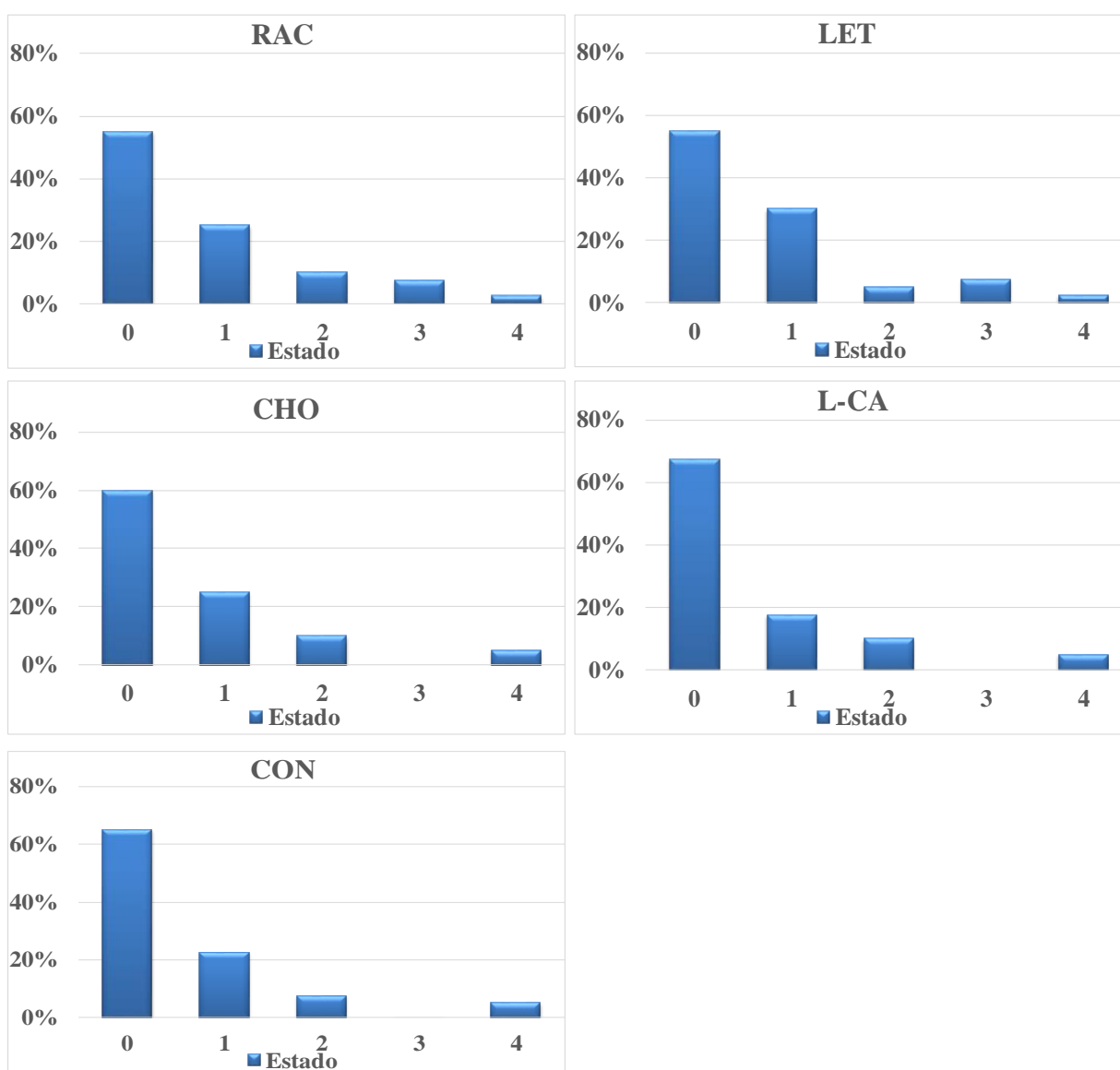
**Tabla 21: Frecuencia de eventos de sequía hidrológica en el año hidrológico.**

	Código	Estación	No Sequía	Sequía Leve	Sequía Moderada	Sequía Severa	Sequía Extrema
VP	E-TI	El Tigre	16	23	1	0	0
	E-CI	El Ciruelo	17	20	3	0	0
	P-ÑA	Puente Ñacara	13	27	0	0	0
	PUC	Puchaca	13	27	0	0	0
	RAC	Racarrumi	22	10	4	3	1
	S-DO	Santo Domingo	16	17	7	0	0
	CHO	Chosica	24	10	4	0	2
	L-CA	La Capilla	27	7	4	0	2
	SOC	Socsi	21	14	2	3	0
	CON	Conta	26	9	3	0	2
	LET	Letrayoc	22	12	2	3	1
	HUAT	Huatiapa	18	16	5	1	0
VT	ILA	Ilave	19	15	6	0	0
	HUAN	Huancané	22	12	5	0	1
	RAM	Ramis	22	11	4	1	2
VA	K105	Km-105	21	12	4	3	0
	SHA	Shanao	18	17	3	2	0
	BOR	Borja	25	9	1	3	2
	CHA	Chazuta	20	15	4	1	0
	S-RE	San Regis	21	10	6	3	0
	REQ	Requena	20	12	8	0	0
	TAM	Tamishiyacu	20	13	5	2	0

FUENTE: Elaboración propia (2016)

La **Tabla 21** muestra los eventos de sequía hidrológica ocurridos en la temporada de todo el año hidrológico (septiembre-agosto) para el periodo de evaluación (1973-2013) de acuerdo a los resultados del índice de sequía hidrológica (SDI). Donde se obtiene gráficamente representadas en las **Figuras 28, 29 y 30**.

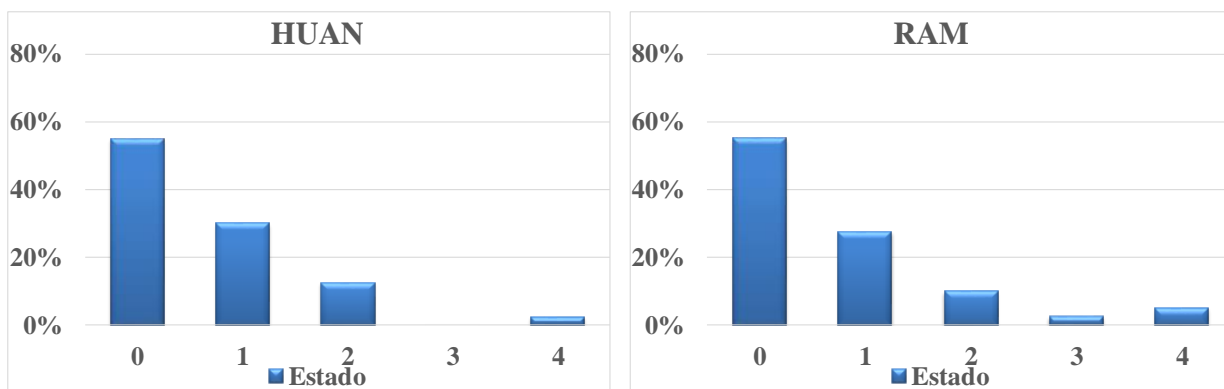
La **Figura 28** muestra en la VP un evento de sequía hidrológica extrema en las estaciones hidrométricas RAC (Racarrumi) y LET (Letrayoc) equivalente al 2.5% del total de eventos evaluados, y dos eventos de sequía hidrológica extrema en la en el año hidrológico en las estaciones CHO (Chosica), L-CA (La Capilla) y CON (Conta) equivalente al 5% del total de eventos evaluados.



**Figura 28: Frecuencia de eventos de sequía hidrológica en el periodo del año hidrológico de la VP.**

FUENTE: Elaboración propia (2016)

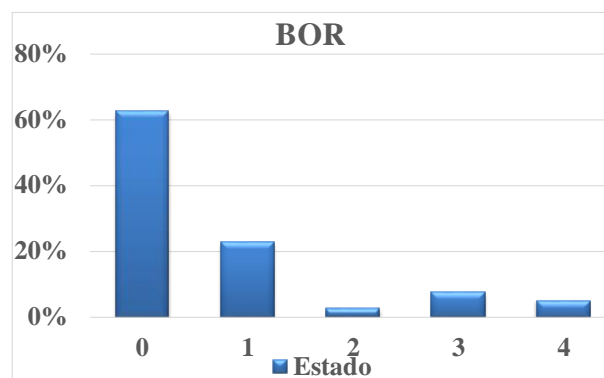
En la **Figura 29** muestra en la VT un evento de sequía hidrológica extrema en la estación hidrométrica HUAN (Huancané) equivalente al 2.5% del total de eventos evaluados, y dos eventos de sequía hidrológica extrema en la en el año hidrológico en la estación hidrométrica RAM (Ramis) equivalente al 5% del total de eventos evaluados.



**Figura 29: Frecuencia de eventos de sequía hidrológica en el periodo del año hidrológico de la VT.**

FUENTE: Elaboración propia (2016)

La **Figura 30** muestra en la VA dos eventos de sequía hidrológica extrema en la estación hidrométrica BOR (Borja) equivalente al 5% del total de eventos evaluados.



**Figura 30: Frecuencia de eventos de sequía hidrológica en el periodo del año hidrológico de la VA.**

FUENTE: Elaboración propia (2016)

#### 5.1.4.5 Extensión espacial

La caracterización espacial y temporal de las sequías hidrológicas mediante el uso de umbrales, muestra la evolución del inicio, desarrollo y el fin de un evento seco e identifica regiones con mayor riesgo a sufrir temporadas secas lo suficientemente severas como para ocasionar un grave desequilibrio hidrológico en las VP, VT y VA.

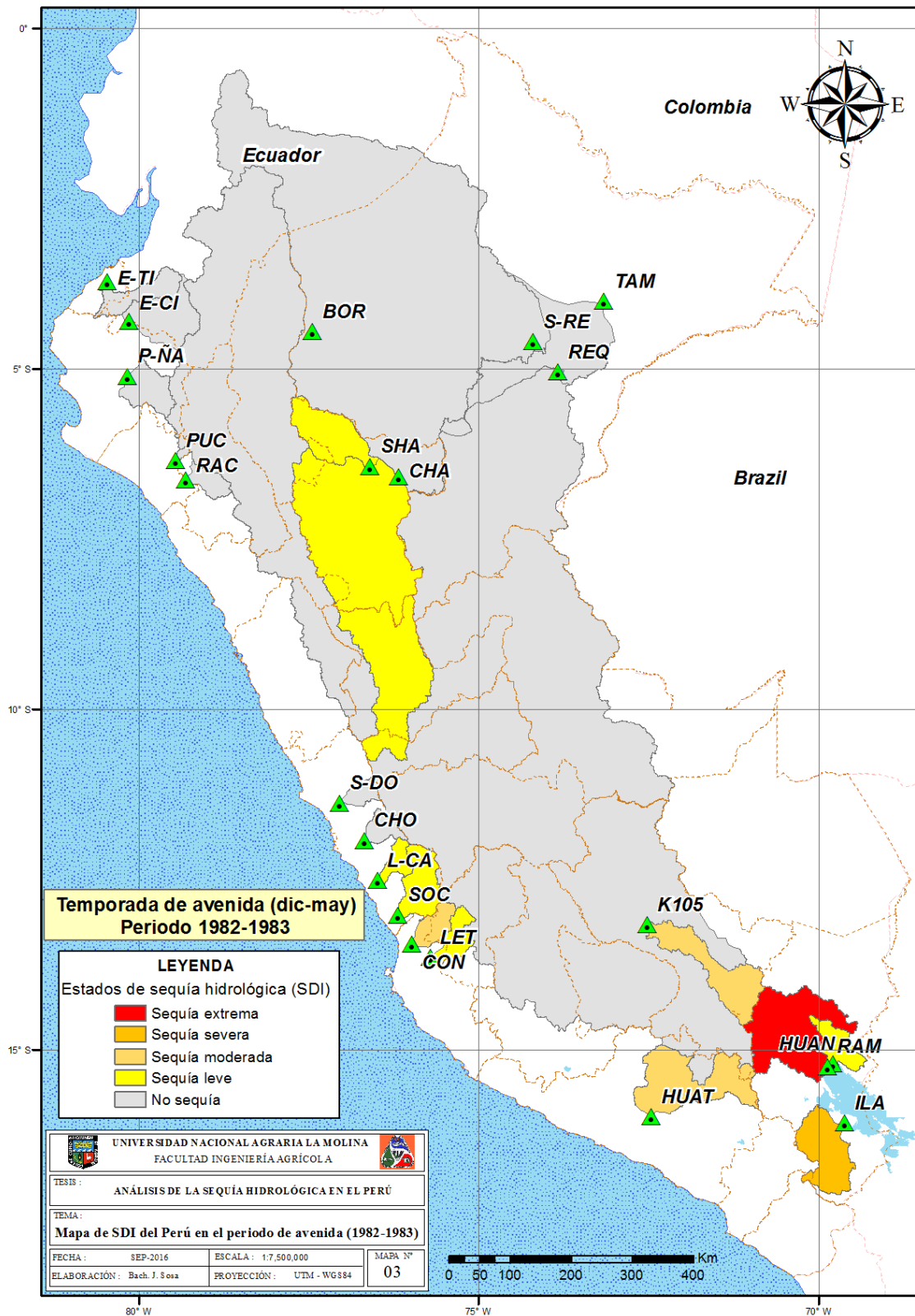
Las **Figuras 31 al 41** muestran los estados de sequía hidrológica (SDI) asociados a una coloración. Verde claro para un estado de no sequía, amarillo para un estado de sequía leve, color oro para el estado de sequía moderada, naranja para el estado de sequía severa y rojo para el estado de sequía extrema. Estos representados durante los episodios ENOS 1982-1983, 1991-1992 y 1997-1998, y el evento de sequía de la campaña 1989-1990 para las temporadas (avenidas, estiaje y como el año hidrológico).

La **Figura 31** muestra condiciones de sequía extrema en la estación hidrométrica RAM (Ramis) para la temporada de avenidas del periodo 1982-1983 y sequía entre leve a moderada en las estaciones hidrométricas de la región VP-ZS.

La **Figura 32** muestra condiciones de sequía entre leve a extrema en la mayoría de las estaciones hidrométricas evaluadas a excepción de BOR (Borja), SHA (Shanao) y CHA (Chazuta) para la temporada de avenidas del periodo 1989-1990.

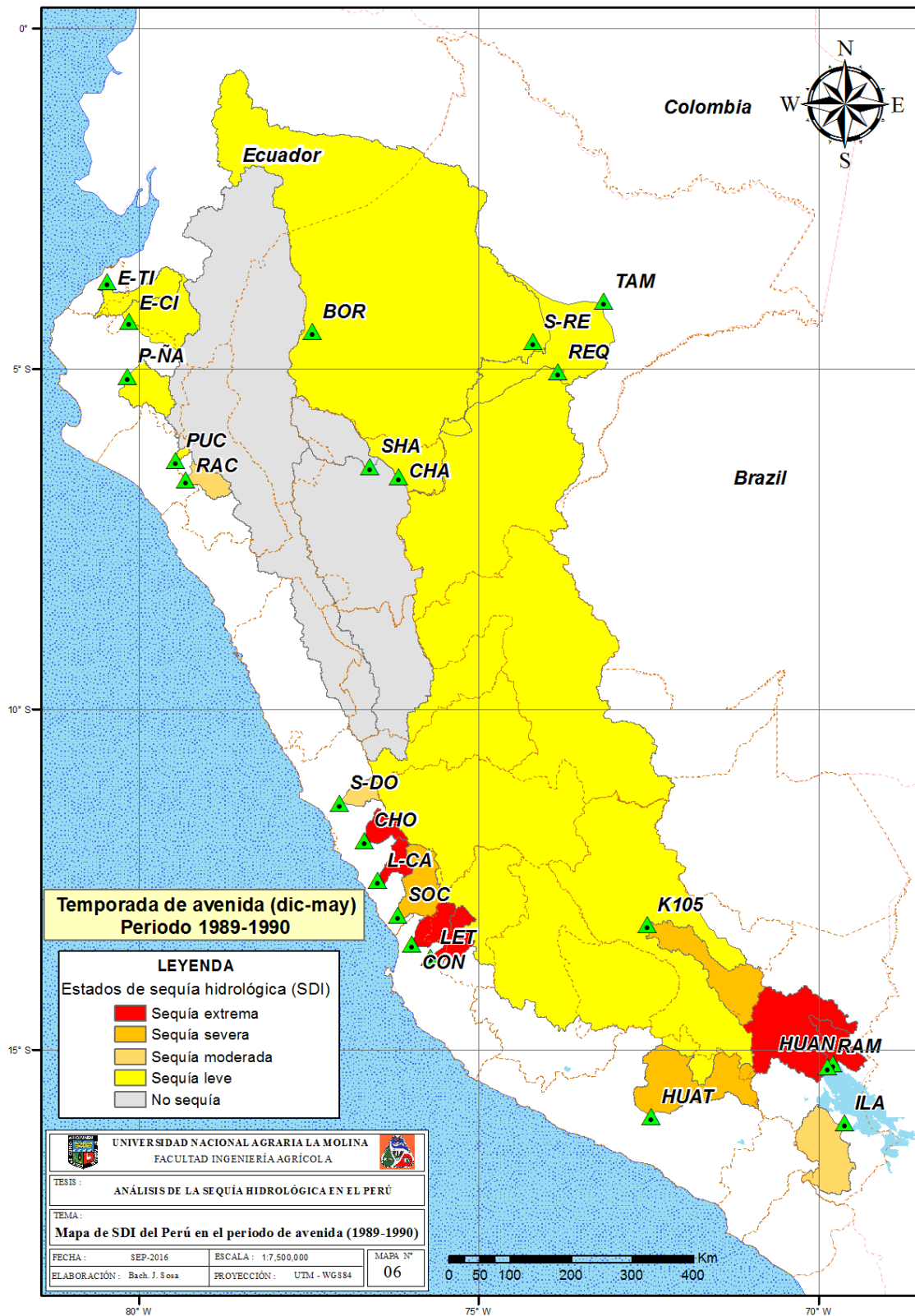
La **Figura 33** muestra condiciones de sequía extrema en las estaciones hidrométricas de CHO (Chosica), L-CA (La Capilla), CON (Conta) y LET (Letrayoc) en la VP, y BOR (Borja), S-RE (San Regis) y TAM (Tamishiyacu) en la VA para la temporada de avenidas del periodo 1991-1992.

La **Figura 34** muestra condiciones de sequía entre leve a moderada en las estaciones hidrométricas de ILA (Ilave), RAM (Ramis) y HUAN (Huancané) en la VT, y S-RE (San Regis), REQ (Requena) y K105 (Km-105) en la VA para la temporada de avenidas del periodo 1997-1998.



**Figura 31: Extensión espacial de los estados de sequía hidrológica según el SDI en el temporada de avenidas del periodo 1982-1983.**

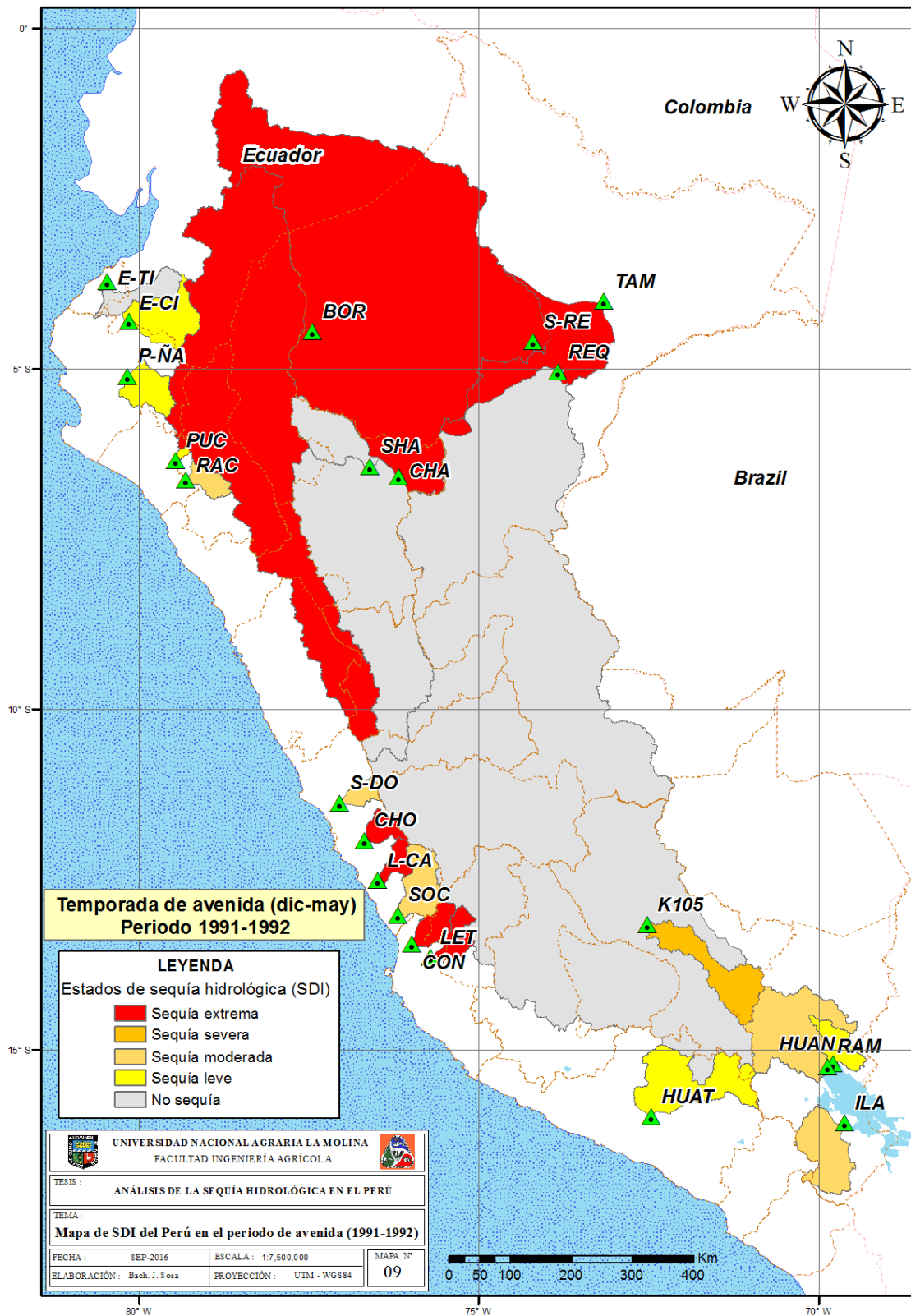
FUENTE: Elaboración propia (2016)



**Figura 32: Extensión espacial de los estados de sequía hidrológica según el SDI en el temporada de avenidas del periodo 1989-1990.**

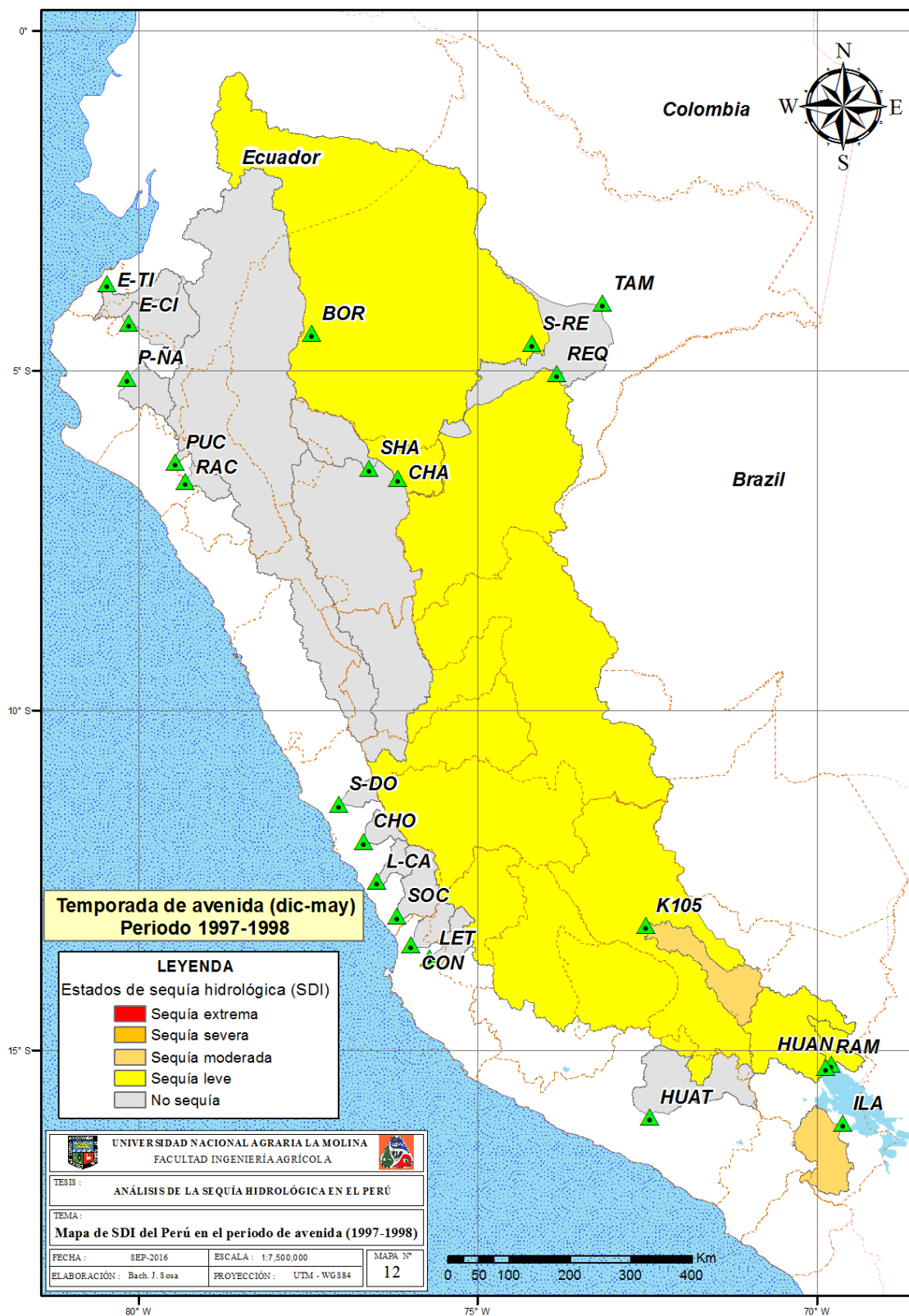
FUENTE: Elaboración propia (2016)





**Figura 33: Extensión espacial de los estados de sequía hidrológica según el SDI en el temporada de avenidas del periodo 1991-1992.**

FUENTE: Elaboración propia (2016)



**Figura 34: Extensión espacial de los estados de sequía hidrológica según el SDI en el temporada de avenidas del periodo 1997-1998.**

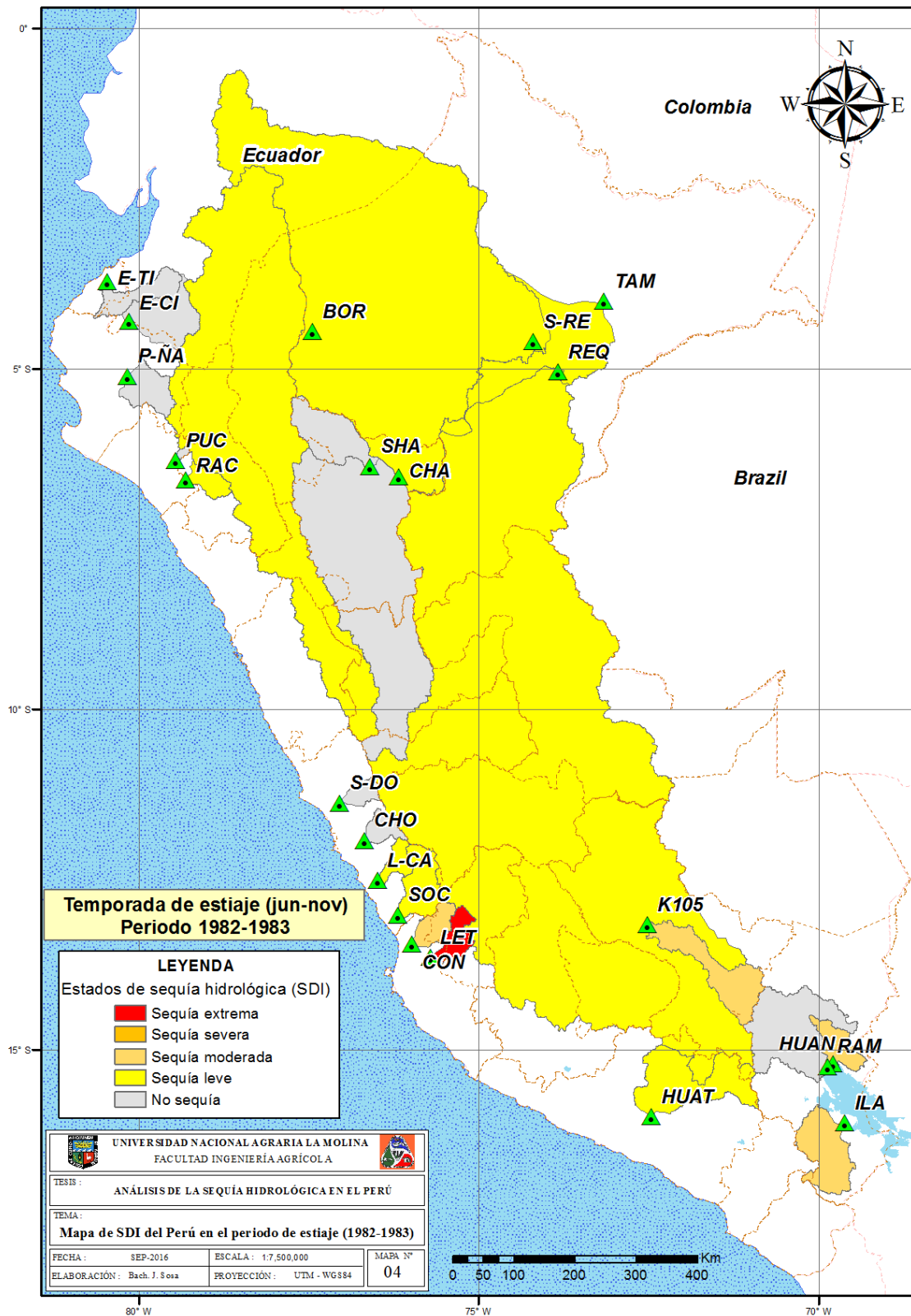
FUENTE: Elaboración propia (2016)

La **Figura 35** muestra condiciones de sequía extrema en la estación hidrométrica LET (Letrayoc) en la VP para la temporada de estiaje del periodo 1982-1983.

La **Figura 36** muestra condiciones de sequía extrema en la estación hidrométrica CHO (Chosica) en la VP para la temporada de estiaje del periodo 1989-1990.

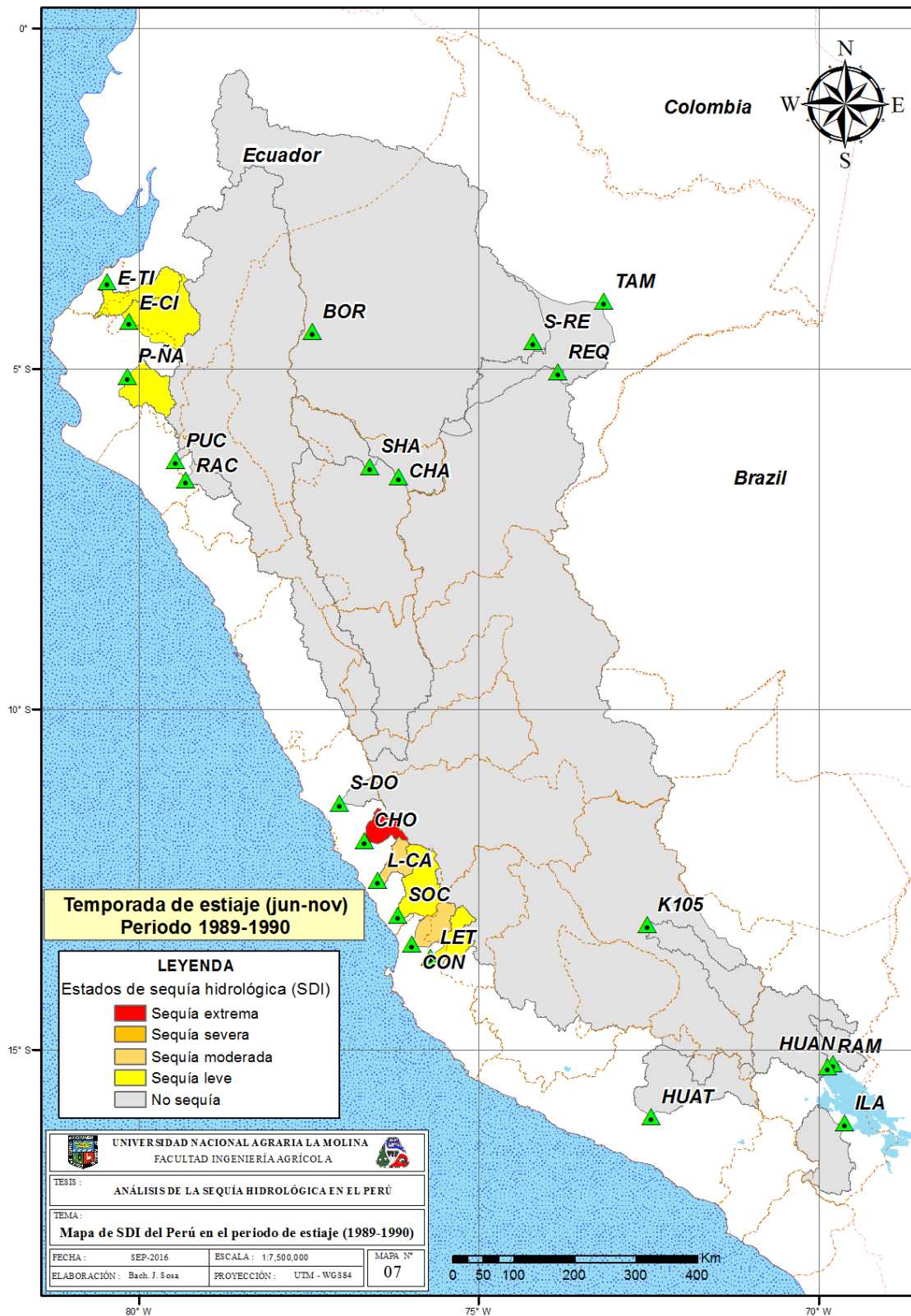
La **Figura 37** muestra condiciones de sequía extrema en la estación hidrométrica CHO (Chosica) en la VP para la temporada de estiaje del periodo 1991-1992.

La **Figura 38** muestra condiciones de sequía entre leve a severa en la mayoría de las estaciones hidrométricas evaluadas a excepción de E-CI (El Ciruelo), P-ÑA (Puente Ñacara), PUC (Puchaca), CHO (Chosica), L-CA (La Capilla), CON (Conta) y LET (Letrayoc) para la temporada de estiaje del periodo 1997-1998.



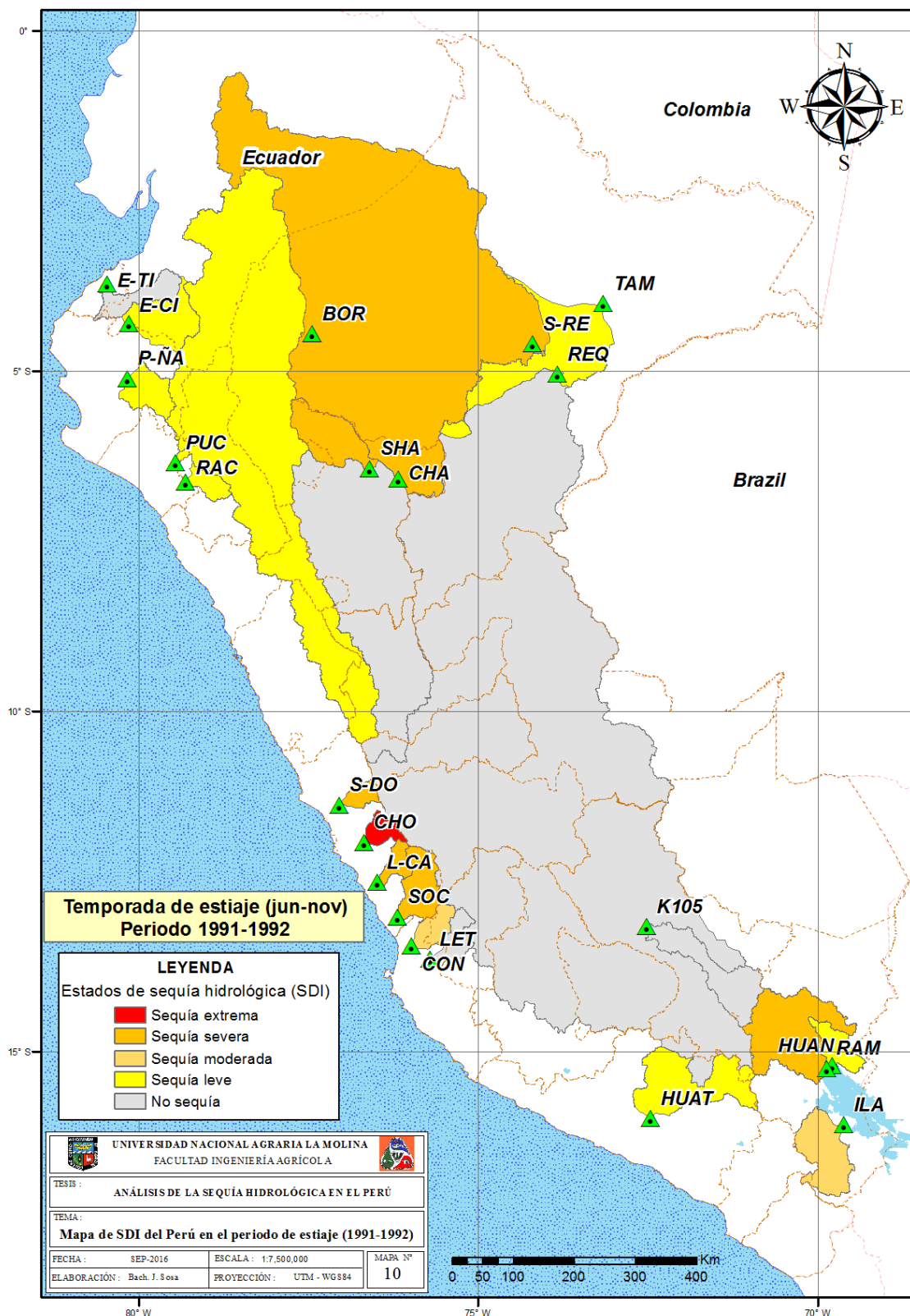
**Figura 35: Extensión espacial de los estados de sequía hidrológica según el SDI en el temporada de estiaje del periodo 1982-1983.**

FUENTE: Elaboración propia (2016)



**Figura 36: Extensión espacial de los estados de sequía hidrológica según el SDI en el temporada de estiaje del periodo 1989-1990.**

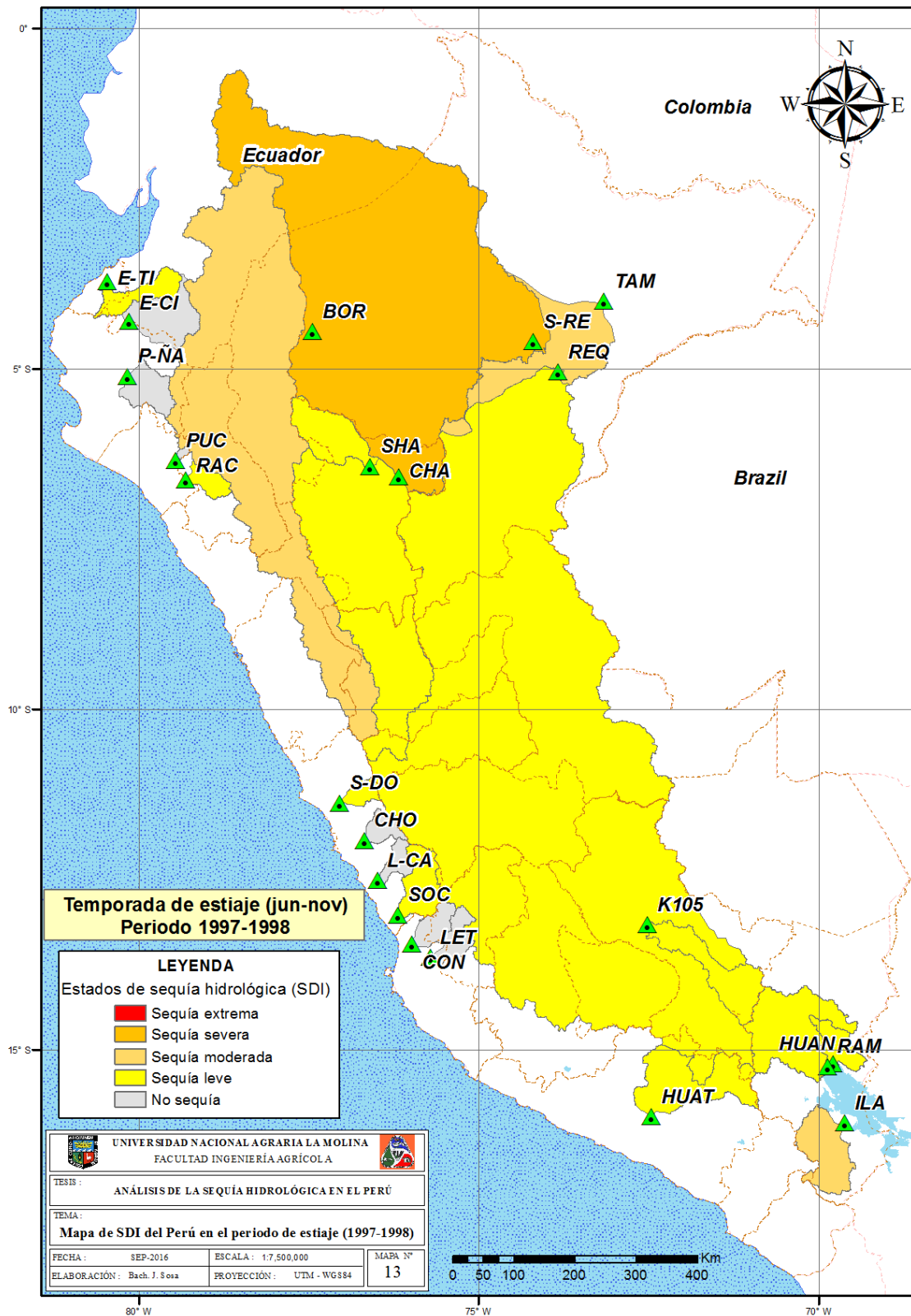
FUENTE: Elaboración propia (2016)



**Figura 37: Extensión espacial de los estados de sequía hidrológica según el SDI en el temporada de estiaje del periodo 1991-1992.**

FUENTE: Elaboración propia (2016)





**Figura 38: Extensión espacial de los estados de sequía hidrológica según el SDI en el temporada de estiaje del periodo 1997-1998.**

FUENTE: Elaboración propia (2016)

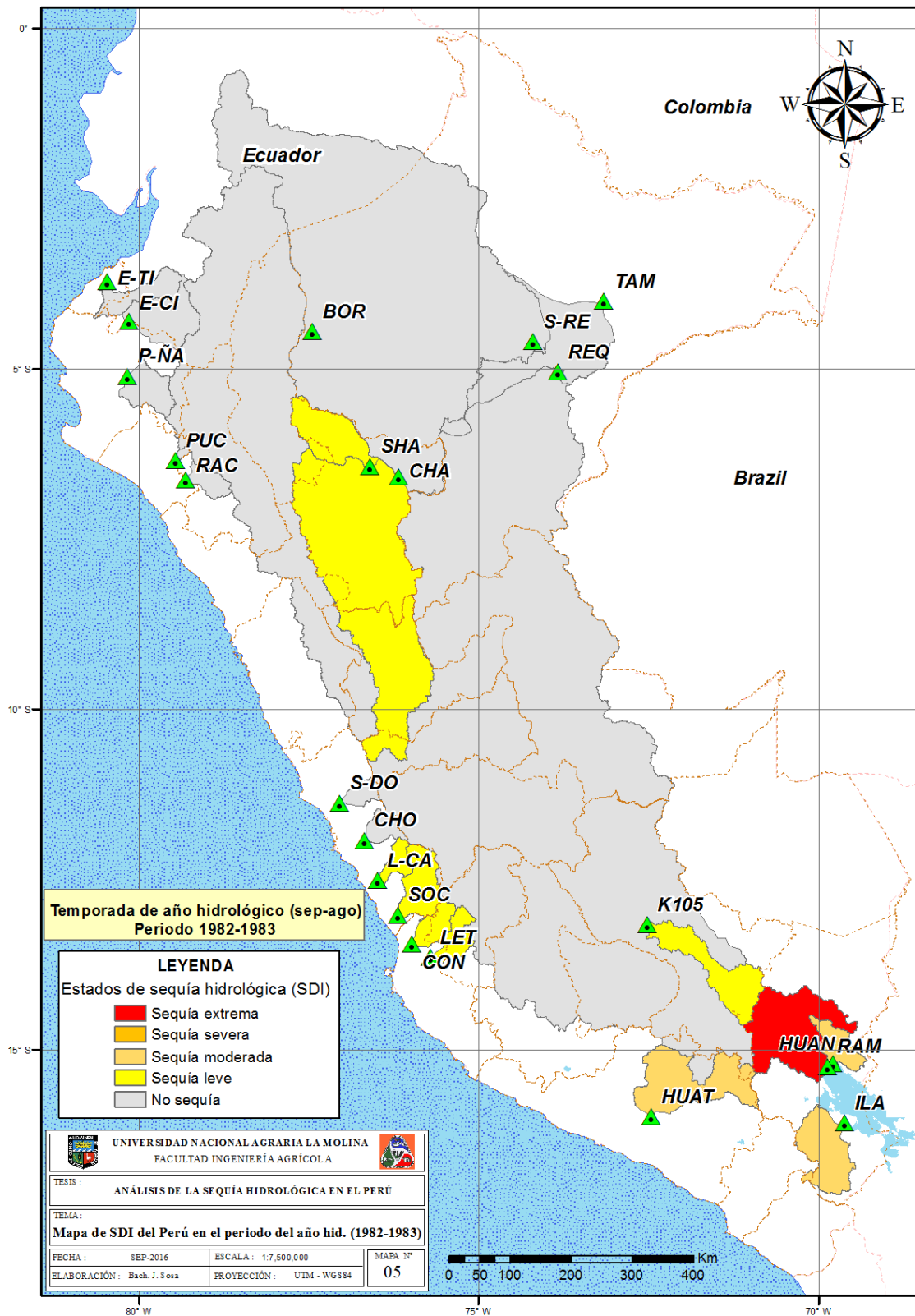
La **Figura 39** muestra condiciones de sequía extrema en la estación hidrométrica RAM (Ramis) en la VT para la temporada del año hidrológico del periodo 1982-1983.

La **Figura 40** muestra condiciones de sequía entre leve a extrema en la mayoría de las estaciones hidrométricas evaluadas a excepción de BOR (Borja), SHA (Shanao) y CHA (Chazuta) para la temporada del año hidrológico del periodo 1989-1990.

La **Figura 41** muestra condiciones de sequía extrema en las estaciones hidrométricas CHO (Chosica), L-CA (La Capilla), CON (Conta) y LET (Letrayoc) en la VP y BOR (Borja) en la VA para la temporada del año hidrológico del periodo 1991-1992.

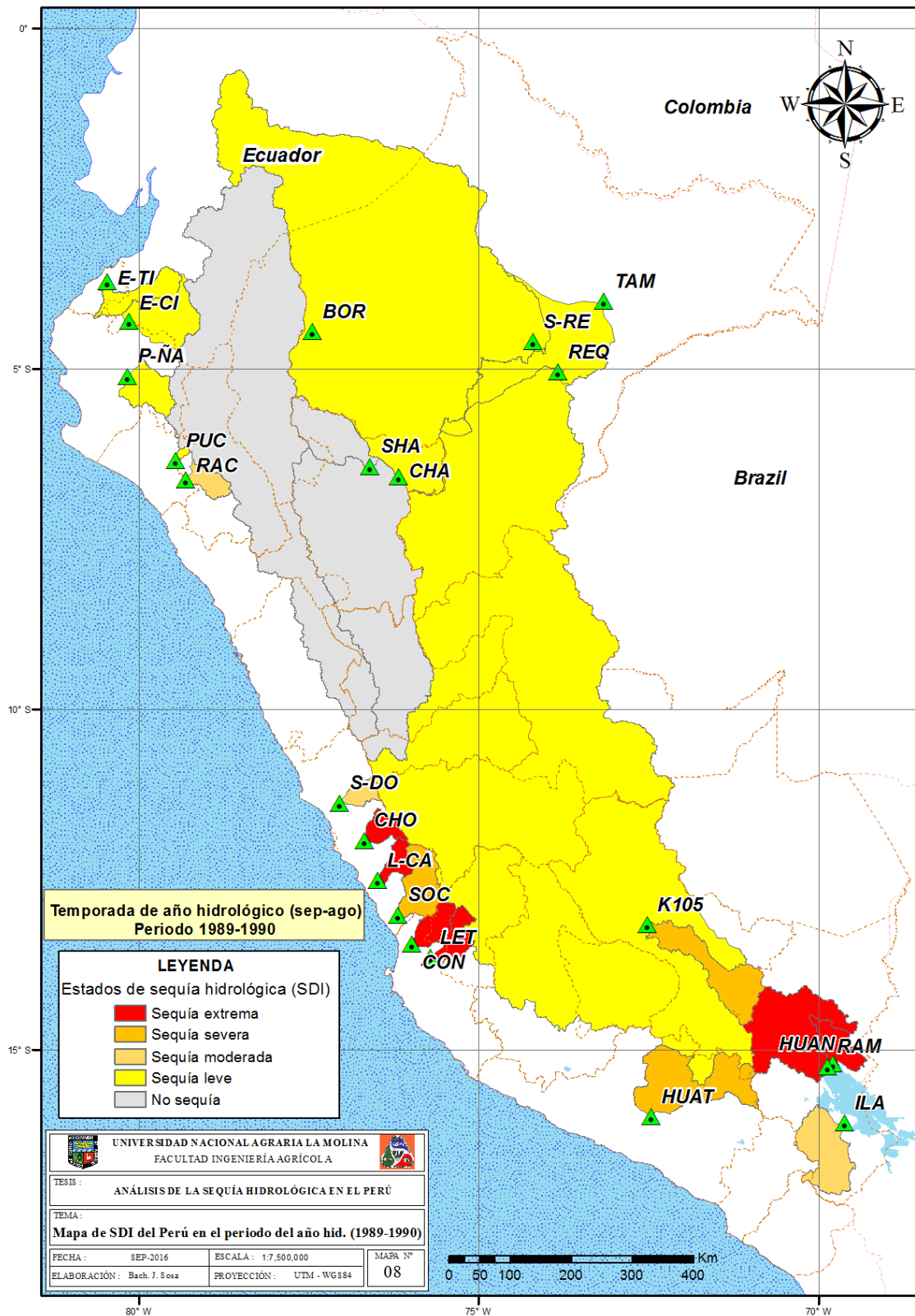
La **Figura 42** muestra condiciones de sequía entre leve a moderada en las estaciones hidrométricas HUAT (Huatiapa) de la VP, en las tres estaciones de la VT y mayoría de las estaciones hidrométricas de la VA a excepción de BOR (Borja) para la temporada del año hidrológico del periodo 1997-1998.





**Figura 39: Extensión espacial de los estados de sequía hidrológica según el SDI en el temporada del año hidrológico del periodo 1982-1983.**

FUENTE: Elaboración propia (2016)



**Figura 40: Extensión espacial de los estados de sequía hidrológica según el SDI en el temporada del año hidrológico del periodo 1989-1990.**

FUENTE: Elaboración propia (2016)

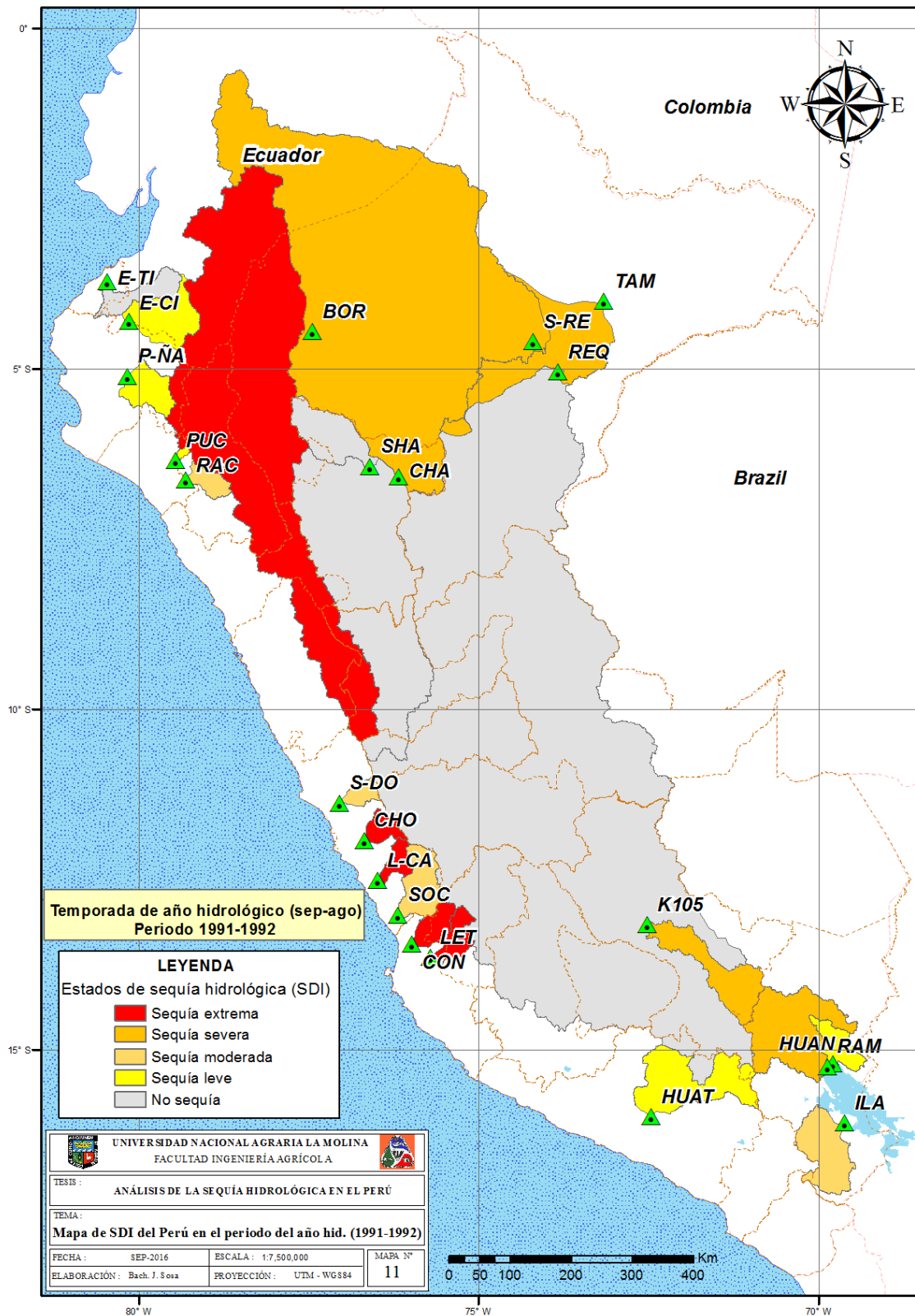
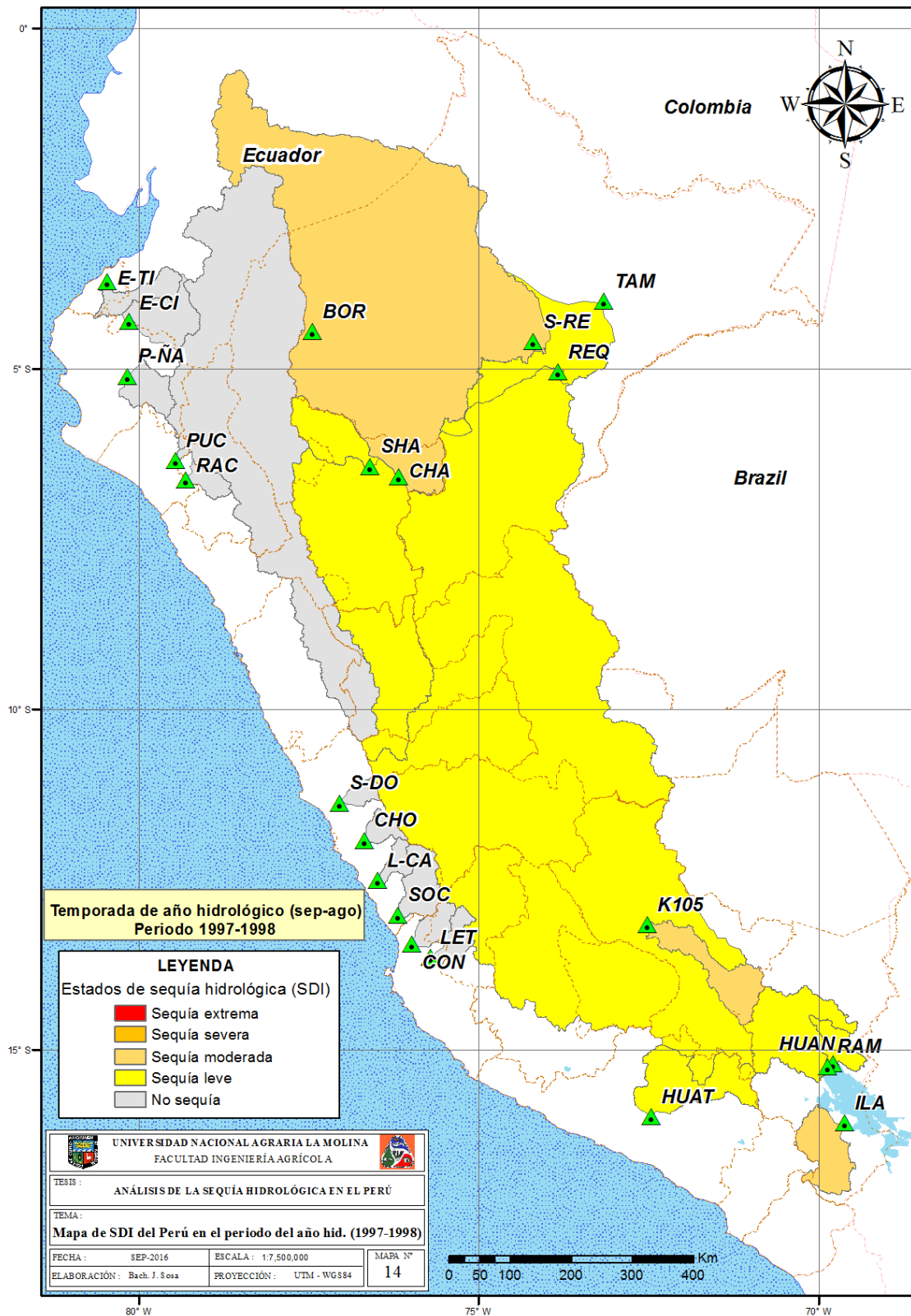


Figura 41: Extensión espacial de los estados de sequía hidrológica según el SDI en el temporada del año hidrológico del periodo 1991-1992.

FUENTE: Elaboración propia (2016)



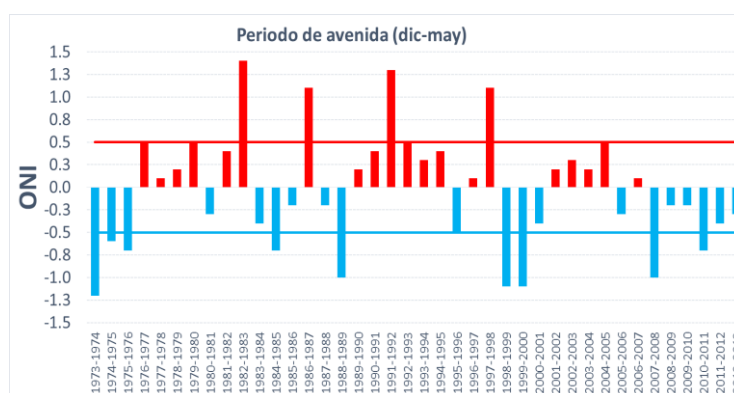
**Figura 42: Extensión espacial de los estados de sequía hidrológica según el SDI en el temporada del año hidrológico del periodo 1997-1998.**

FUENTE: Elaboración propia (2016)

### 5.1.5 Análisis de riesgo de sequía en ENOS

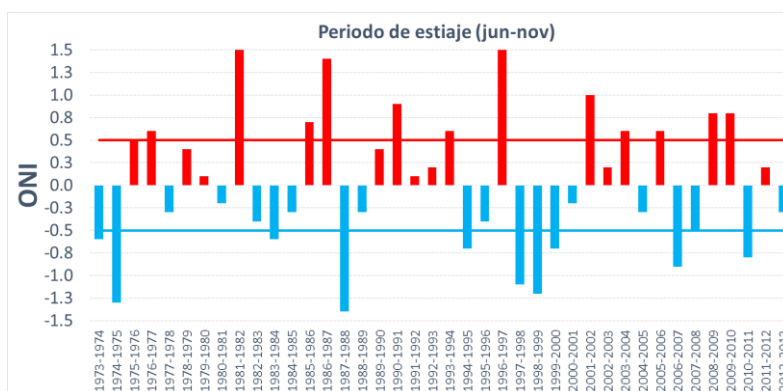
Identificados los eventos de sequía hidrológica caracterizada por el índice de sequía de caudales (SDI) en las veintidós estaciones hidrométricas de la vertiente del Pacífico (VP), en la Vertiente del Titicaca (VT) y en la Vertiente Amazonas (VA) ocurridas entre los años 1973 – 2013 para las temporadas de avenidas, estiaje y del año hidrológico se procedió a calcular la probabilidad de ocurrencia de los eventos de sequía hidrológica en toda la serie de análisis.

Del **Anexo 5** se identificaron los episodios ENOS ocurridos entre los años 1973-2013 a partir de los promedios del Índice Oceánico de El Niño (ONI) para la temporada de avenidas (diciembre-mayo), estiaje (junio-noviembre) y año hidrológico (septiembre-agosto) de acuerdo a los umbrales descritos en la **Tabla 6**, las cuales se representan en las **Figuras 43, 44 y 45** respectivamente.



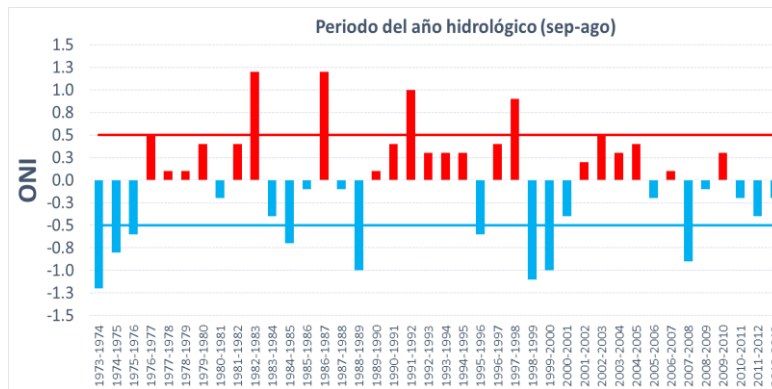
**Figura 43: Serie ONI en el temporada de avenidas.**

FUENTE: Elaboración propia (2016)



**Figura 44: Serie ONI en el temporada de estiaje.**

FUENTE: Elaboración propia (2016)



**Figura 45: Serie ONI en el temporada de año hidrológico.**

FUENTE: Elaboración propia (2016)

Identificados los episodios ENOS entre los años 1973-2013 se determinaron las probabilidades de ocurrencia de episodios ENOS para los eventos cálidos (El Niño) y fríos (La Niña) con incidencia de sequías hidrológicas según el SDI.

Finalmente, el calculó el riesgo de sequía hidrológica asociado a los episodios ENOS, para los eventos cálidos (El Niño) y fríos (La Niña) se basó simplemente la relación de la probabilidad de la  $SDI < 0$  bajo ENOS para que en todas las condiciones (**ecuación 15**). Un valor más grande y menos de 1 indica un riesgo más alto de lo normal y un riesgo más bajo de lo normal, respectivamente. Cuanto más lejos el riesgo está fuera de 1, mayor será la probabilidad de que la anomalía. Dando como resultados las **Tablas 22, 23 y 24** para los tres periodos de evaluación.



**Tabla 22: Resumen de análisis de riesgo de sequía hidrológica en los episodios ENOS en temporada de avenidas.**

Avenidas	E-TI	E-CI	P-ÑA	PUC	RAC	S-DO	CHO	L-CA	SOC	CON	LET	HUAT	ILA	HUAN	RAM	K105	SHA	BOR	CHA	S-RE	REQ	TAM
N° Sequía hidrológica (73-13)	23	23	26	28	21	24	17	12	19	14	17	22	22	23	18	17	21	15	21	21	18	20
P(SDI<0)	0.58	0.58	0.65	0.70	0.53	0.60	0.43	0.30	0.48	0.35	0.43	0.55	0.55	0.58	0.45	0.43	0.53	0.38	0.53	0.53	0.45	0.50
<b>N° Eventos El Niño (73-13)</b>	8	8	8	8	8	8	8	8	8	8	8	8	8	8	8	8	8	8	8	8	8	8
<b>N° Eventos La Niña(73-13)</b>	10	10	10	10	10	10	10	10	10	10	10	10	10	10	10	10	10	10	10	10	10	10
P(SDI<0 ENSO)Niño	0.38	0.63	0.63	0.63	0.63	0.63	0.63	0.50	0.63	0.50	0.88	0.88	0.88	1.00	1.00	1.00	0.63	0.38	0.63	0.50	0.38	0.38
P(SDI<0 ENSO)Niña	0.40	0.30	0.50	0.50	0.40	0.50	0.30	0.10	0.40	0.10	0.30	0.10	0.20	0.60	0.30	0.40	0.40	0.30	0.40	0.50	0.20	0.50
<b>Riesgo de Sequía (Niño)</b>	0.7	<b>1.1</b>	1.0	0.9	<b>1.2</b>	1.0	<b>1.5</b>	<b>1.7</b>	<b>1.3</b>	<b>1.4</b>	<b>2.1</b>	<b>1.6</b>	<b>1.6</b>	<b>1.7</b>	<b>2.2</b>	<b>2.4</b>	<b>1.2</b>	1.0	<b>1.2</b>	1.0	0.8	0.8
<b>Riesgo de Sequía (Niña)</b>	0.7	0.5	0.8	0.7	0.8	0.8	0.7	0.3	0.8	0.3	0.7	0.2	0.4	1.0	0.7	0.9	0.8	0.8	0.8	1.0	0.4	1.0

FUENTE: Elaboración propia (2016)

**Tabla 23: Resumen de análisis de riesgo de sequía hidrológica en los episodios ENOS en temporada de estiaje.**

Estiaje	E-TI	E-CI	P-ÑA	PUC	RAC	S-DO	CHO	L-CA	SOC	CON	LET	HUAT	ILA	HUAN	RAM	K105	SHA	BOR	CHA	S-RE	REQ	TAM
N° Sequía hidrológica (73-13)	25	26	32	22	22	23	18	24	23	19	17	22	20	22	25	23	20	20	23	19	23	19
P(SDI<0)	0.63	0.65	0.80	0.55	0.55	0.58	0.45	0.60	0.58	0.48	0.43	0.55	0.50	0.55	0.63	0.58	0.50	0.50	0.58	0.48	0.58	0.48
<b>N° Eventos El Niño (73-13)</b>	13	13	13	13	13	13	13	13	13	13	13	13	13	13	13	13	13	13	13	13	13	13
<b>N° Eventos La Niña(73-13)</b>	11	11	11	11	11	11	11	11	11	11	11	11	11	11	11	11	11	11	11	11	11	11
P(SDI<0 ENSO)Niño	0.69	0.69	1.00	0.69	0.69	0.62	0.46	0.46	0.46	0.38	0.38	0.46	0.38	0.38	0.62	0.54	0.62	0.46	0.62	0.38	0.54	0.38
P(SDI<0 ENSO)Niña	0.45	0.45	0.55	0.27	0.27	0.64	0.36	0.45	0.82	0.27	0.36	0.55	0.64	0.73	0.82	0.82	0.36	0.45	0.64	0.55	0.73	0.55
<b>Riesgo de Sequía (Niño)</b>	<b>1.1</b>	<b>1.1</b>	<b>1.3</b>	<b>1.3</b>	<b>1.3</b>	<b>1.1</b>	1.0	0.8	0.8	0.8	0.9	0.8	0.8	0.7	1.0	0.9	<b>1.2</b>	0.9	<b>1.1</b>	0.8	0.9	0.8
<b>Riesgo de Sequía (Niña)</b>	0.7	0.7	0.7	0.5	0.5	<b>1.1</b>	0.8	0.8	<b>1.4</b>	0.6	0.9	1.0	<b>1.3</b>	<b>1.3</b>	<b>1.3</b>	<b>1.4</b>	0.7	0.9	<b>1.1</b>	<b>1.1</b>	<b>1.3</b>	<b>1.1</b>

FUENTE: Elaboración propia (2016)

**Tabla 24: Resumen de análisis de riesgo de sequía hidrológica en los episodios ENOS en temporada del año hidrológico.**

Año hidrológico	E-TI	E-CI	P-ÑA	PUC	RAC	S-DO	CHO	L-CA	SOC	CON	LET	HUAT	ILA	HUAN	RAM	K105	SHA	BOR	CHA	S-RE	REQ	TAM
N° Sequía hidrológica (73-13)	24	23	27	27	18	24	16	13	19	14	18	22	21	18	18	19	22	15	20	19	20	20
P(SDI<0)	0.60	0.58	0.68	0.68	0.45	0.60	0.40	0.33	0.48	0.35	0.45	0.55	0.53	0.45	0.45	0.48	0.55	0.38	0.50	0.48	0.50	0.50
<b>N° Eventos El Niño (73-13)</b>	6	6	6	6	6	6	6	6	6	6	6	6	6	6	6	6	6	6	6	6	6	6
<b>N° Eventos La Niña(73-13)</b>	9	9	9	9	9	9	9	9	9	9	9	9	9	9	9	9	9	9	9	9	9	9
P(SDI<0 ENSO)Niño	0.33	0.67	0.50	0.50	0.67	0.33	0.33	0.67	0.50	0.50	0.67	1.00	0.83	0.67	0.83	0.83	0.67	0.33	0.67	0.50	0.33	0.33
P(SDI<0 ENSO)Niña	0.33	0.22	0.56	0.44	0.11	0.56	0.44	0.11	0.33	0.11	0.33	0.11	0.22	0.56	0.44	0.67	0.33	0.22	0.33	0.33	0.33	0.44
<b>Riesgo de Sequía (Niño)</b>	0.6	<b>1.2</b>	0.7	0.7	<b>1.5</b>	0.6	0.8	<b>2.1</b>	<b>1.1</b>	<b>1.4</b>	<b>1.5</b>	<b>1.8</b>	<b>1.6</b>	<b>1.5</b>	<b>1.9</b>	<b>1.8</b>	<b>1.2</b>	0.9	<b>1.3</b>	<b>1.1</b>	0.7	0.7
<b>Riesgo de Sequía (Niña)</b>	0.6	0.4	0.8	0.7	0.2	0.9	<b>1.1</b>	0.3	0.7	0.3	0.7	0.2	0.4	<b>1.2</b>	1.0	<b>1.4</b>	0.6	0.6	0.7	0.7	0.7	0.9

FUENTE: Elaboración propia (2016)



Las **Tablas 22, 23 y 24** muestran los números de los eventos de sequía hidrológica por estación y su respectivas probabilidades de ocurrencia en el periodo de evaluación (1973-2013) para las temporadas de avenidas (diciembre-mayo), estiaje (junio-noviembre) y año hidrológico (septiembre-agosto) respectivamente; los números de los episodios ENOS según los eventos El Niño y La Niña durante los periodos y temporadas de evaluación; la probabilidad de ocurrencia de sequía hidrológica en los episodios ENOS según los eventos El Niño y La Niña durante los periodos de evaluación y finalmente el riesgo de sequía hidrológica en los episodios ENOS (El Niño y La Niña) para cada estación hidrométrica evaluada.

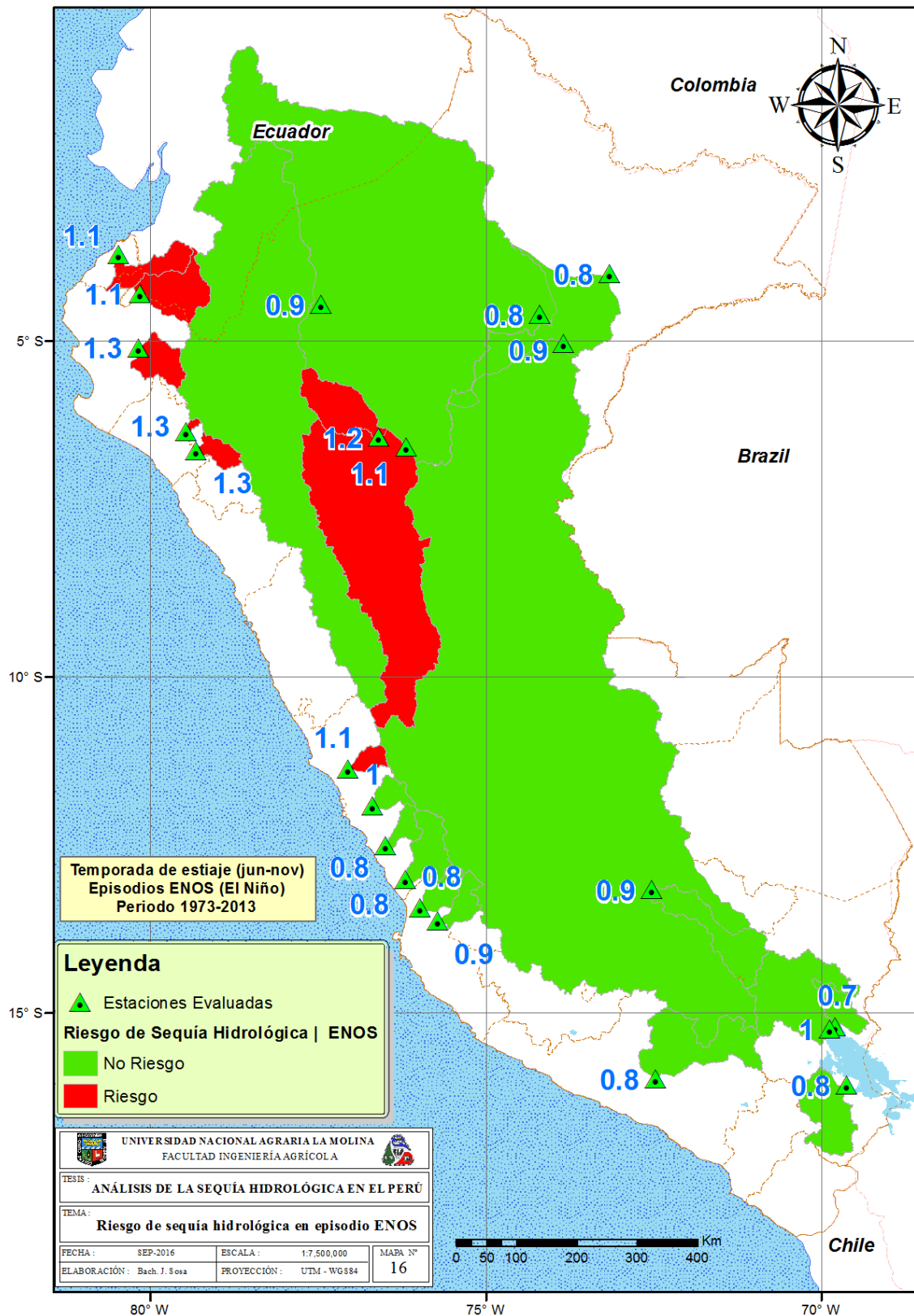
Los mapas de riesgo de sequía hidrológica en los episodios ENOS con incidencia en los eventos La Niña en el periodo de evaluación (1973-2013) para las temporadas de avenidas (diciembre-mayo), estiaje (junio-noviembre) y año hidrológico (septiembre-agosto) se muestran en el **Anexo 6**.

La **Figura 46** muestra el resultado de las condiciones de alto riesgo de sequía hidrológica en los episodios ENOS con incidencia en los eventos El Niño en temporada de avenidas en la mayoría de estaciones hidrométricas de la VP con excepción de E-TI (El Tigre), P-ÑA (Puente Ñacara), PUC (Puchaca) y S-DO (Santo Domingo).

En la VT se puede apreciar condiciones de alto riesgo de sequía hidrológica en los episodios ENOS con incidencia en los eventos El Niño en temporada de avenidas en las tres estaciones hidrométricas evaluadas.

En la VA se puede apreciar condiciones de alto riesgo de sequía hidrológica en los episodios ENOS con incidencia en los eventos El Niño en la temporada de avenidas en la mayoría de estaciones hidrométricas con excepción de BOR (Borja), S-RE (San Regis), REQ (Requena) y TAM (Tamishiyacu).

De la **Tabla 22** no se detectaron riesgo significativo de sequía hidrológica en los episodios ENOS con incidencia en los eventos La Niña en la temporada de avenidas en ninguna de las estaciones hidrométricas evaluadas de las tres vertientes hidrográficas.



**Figura 46: Mapa de riesgo de sequía hidrológica en episodio ENOS (El Niño) en el temporada de avenidas.**

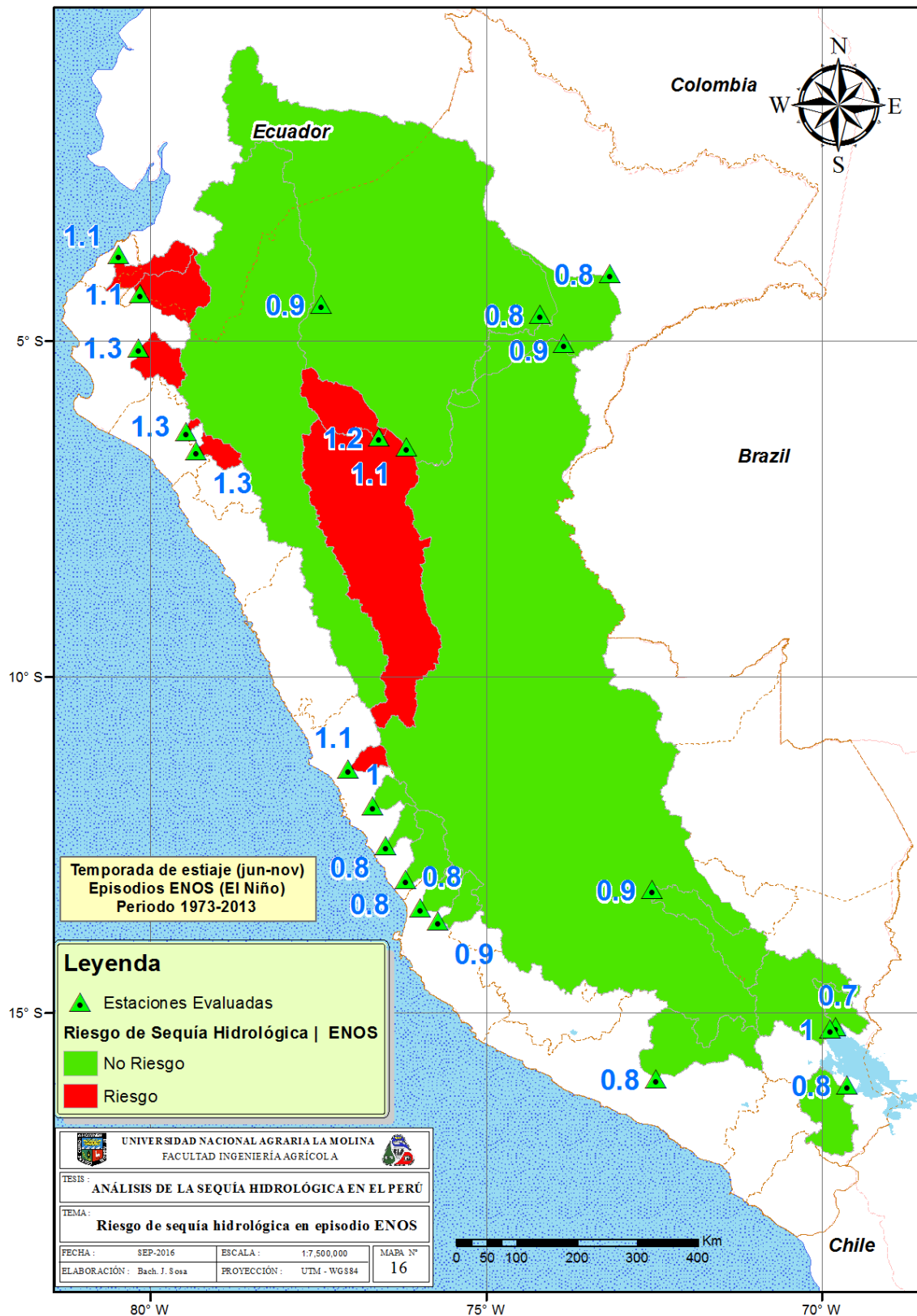
FUENTE: Elaboración propia (2016)

La **Figura 47** muestra el resultado de las condiciones de alto riesgo de sequía hidrológica en los episodios ENOS con incidencia en los eventos El Niño en temporada de estiaje en la mayoría de estaciones hidrométricas de la región VP-ZN y en S-DO (Santo Domingo) de la región VP-ZC de la VP.

De la **Tabla 23** no se detectaron riesgos significativos de sequía hidrológica en los episodios ENOS con incidencia en los eventos La Niña en la temporada de estiaje la mayoría de las estaciones hidrométricas con excepción de S-DO (Santo Domingo) y SOC (Socsi) de la región VP-ZC de la VP.

En la VT no se detectó ningún riesgo significativo de sequía hidrológica en los episodios ENOS con incidencia en los eventos El Niño en temporada de estiaje en las tres estaciones hidrométricas evaluadas. Sin embargo, se detectaron condiciones de alto riesgo de sequía hidrológica en los episodios ENOS con incidencia en los eventos La Niña en la temporada de estiaje en las tres estaciones hidrométricas evaluadas.

En la VA se puede apreciar condiciones de alto riesgo de sequía hidrológica en los episodios ENOS con incidencia en los eventos El Niño en temporada de estiaje en las estaciones hidrométricas SHA (Shanao) y CHA (Chazuta). Asimismo se detectaron condiciones de alto riesgo de sequía hidrológica en los episodios ENOS con incidencia en los eventos La Niña en la temporada de estiaje en la mayoría de las estaciones hidrométricas evaluadas a excepción de SHA (Shanao) y BOR (Borja).



**Figura 47: Mapa de riesgo de sequía hidrológica en episodio ENOS (El Niño) en el temporada de estiaje.**

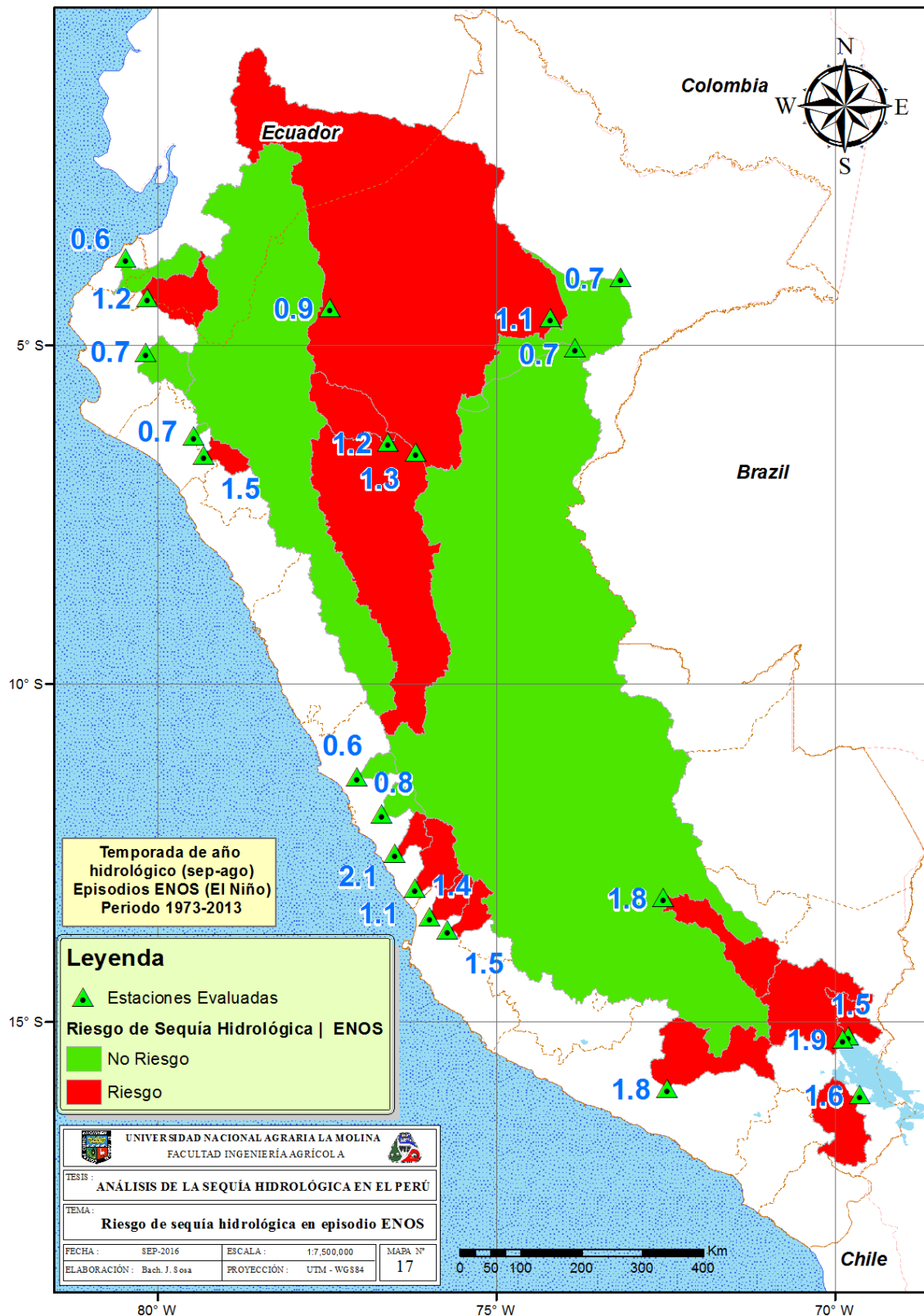
FUENTE: Elaboración propia (2016)

La **Figura 48** muestra el resultado de las condiciones de alto riesgo de sequía hidrológica en los episodios ENOS con incidencia en los eventos El Niño en temporada del año hidrológico en las estaciones hidrométricas E-CI (El Ciruelo) y RAC (Racarrumi) de la región VP-ZN, L-CA (La Capilla) de la región VP-ZC y las cuatro estaciones hidrométricas de la región VP-ZS de la VP.

De la **Tabla 24** no se detectaron riesgos significativos de sequía hidrológica en los episodios ENOS con incidencia en los eventos La Niña en la temporada del año hidrológico en la mayoría de las estaciones hidrométricas con excepción de CHO (Chosica) de la región VP-ZC de la VP.

En la VT se puede apreciar condiciones de alto riesgo de sequía hidrológica en los episodios ENOS con incidencia en los eventos El Niño en temporada de año hidrológico en las tres estaciones hidrométricas evaluadas. Asimismo, se detectaron condiciones de alto riesgo de sequía hidrológica en los episodios ENOS con incidencia en los eventos La Niña en la temporada del año hidrológico en la estación hidrométrica de HUAN (Huancané).

En la VA se puede apreciar condiciones de alto riesgo de sequía hidrológica en los episodios ENOS con incidencia en los eventos El Niño en temporada del año hidrológico en la mayoría de las estaciones hidrométricas a excepción de BOR (Borja) y REQ (Requena). Asimismo se detectaron condiciones de alto riesgo de sequía hidrológica en los episodios ENOS con incidencia en los eventos La Niña en la temporada del año hidrológico en la estación hidrometría K105 (Km-105).



**Figura 48: Mapa de riesgo de sequía hidrológica en episodio ENOS (El Niño) en el temporada del año hidrológico.**

FUENTE: Elaboración propia (2016)

### 5.1.6 Análisis de lluvia mediante SDI (SDI-lluvia)

El análisis de lluvia se realizó mediante la metodología del SDI propuesto por Nalbantis y Tsakaris (2008) usando como variable principal la precipitación mensual areal para las siete cuencas reguladas de la VP correspondiente a las estaciones hidrométricas P-ÑA (Puente Ñacara), RAC (Racarrumi), CHO (Chosica), SOC (Socsi), CON (Conta), LET (Letrayoc) y HUAT (Huatiapa), con la finalidad de complementar el diagnóstico de sequía identificadas mediante el SDI en las cuencas reguladas de la vertiente del Pacífico, en las que se evaluarán previamente mediante un test de normalidad a la precipitación mensual areal acumulada de la serie considerando los coeficientes de asimetría de la serie de datos iniciales y de los logaritmos naturales de la misma serie de datos iniciales, según sea el periodo de evaluación (temporada avenidas, estiaje y año hidrológico) finalmente se procede a calcular el índice del SDI para la variable lluvia de acuerdo a las ecuaciones 3 y 4 según sea el caso evaluado previamente según el test de normalidad para cuencas reguladas de la VP.

La **Tabla 25** muestra el coeficiente de asimetría de las veintidós series de las estaciones hidrométricas evaluadas. De acuerdo con la prueba de Snedecor y Cochran (1967) para cuarenta años de datos observados los límites superiores críticos del valor absoluto del coeficiente de asimetría ( $|\hat{\gamma}|$ ) es igual a 0.87 y 0.587, respectivamente, a 0.02 y 0.10 nivel de significación. Por lo tanto, las series a considerar luego del test de normalidad fueron sombreadas de color verde.

**Tabla 25: Coeficiente de asimetría de las lluvias acumuladas y de su logaritmo natural.**

	Cuenca	Base de cálculo	Avenida (dic-may)	Estiaje (jun-nov)	Año Hidrologico (sep-ago)
<b>VP (CUENCAS REGULADAS)</b>	P-ÑA	Dato inicial	0.483	-0.156	0.512
		Logaritmos	2.090	1.373	2.147
	RAC	Dato inicial	-0.371	-0.700	-0.4547
		Logaritmos	0.662	0.062	0.4050
	CHO	Dato inicial	-0.900	-0.259	-1.002
		Logaritmos	0.163	1.019	-0.163
	SOC	Dato inicial	-1.819	-0.215	-1.924
		Logaritmos	-0.153	1.459	-0.228
	CON	Dato inicial	-1.578	-1.094	-0.777
		Logaritmos	0.240	0.997	0.266
	LET	Dato inicial	-0.659	-0.360	-0.688
		Logaritmos	0.234	0.498	0.131
	HUAT	Dato inicial	-1.503	-0.476	-1.006
		Logaritmos	0.036	0.672	0.066

FUENTE: Elaboración propia (2016)

Los valores SDI-lluvia positivos aplicados en el análisis de lluvia reflejan condiciones de humedad mientras que los valores negativos indican déficit hídrico. De forma similar al SDI, se definen en cinco estados de déficit hídrico de lluvias indicados por un número entero que va de 0 (No sequía) a 4 (sequía extrema) se definen a través de los criterios de la **Tabla 3**.

Las **Tablas 26, 27 y 28** describen los estados de sequía hidrológica asociados a una coloración: verde claro para un estado de no sequía, amarillo para un estado de sequía leve, color oro para el estado de sequía moderada, naranja para el estado de sequía severa y rojo para el estado de sequía extrema.



Tabla 26: Estados del SDI-lluvia en la temporada de avenidas.

AÑO H.	AVENIDAS (DIC-MAY)						
	P-ÑA	RAC	CHO	SOC	CON	LET	HUAT
1973-1974	2	1	0	1	1	1	0
1974-1975	0	0	0	1	0	1	0
1975-1976	0	0	0	0	0	1	0
1976-1977	0	1	0	1	0	0	1
1977-1978	1	3	1	2	1	1	1
1978-1979	1	2	1	1	1	2	2
1979-1980	2	4	2	3	1	1	1
1980-1981	0	1	0	1	1	1	0
1981-1982	2	1	1	1	1	1	2
1982-1983	0	0	1	3	4	3	3
1983-1984	0	0	0	0	0	1	0
1984-1985	2	1	0	1	2	2	1
1985-1986	1	1	0	0	0	0	0
1986-1987	0	0	0	1	1	1	1
1987-1988	2	0	1	1	0	1	1
1988-1989	0	0	0	0	0	0	0
1989-1990	3	4	4	2	1	1	3
1990-1991	2	1	1	1	1	1	0
1991-1992	0	2	3	4	2	2	4
1992-1993	0	0	0	1	0	0	1
1993-1994	0	0	0	0	0	0	0
1994-1995	1	1	2	2	1	1	1
1995-1996	2	0	1	0	1	1	1
1996-1997	1	1	3	1	2	2	0
1997-1998	0	0	0	0	0	0	1
1998-1999	0	0	0	0	0	0	0
1999-2000	0	0	0	0	0	0	0
2000-2001	0	0	0	0	0	0	0
2001-2002	0	0	2	0	0	0	0
2002-2003	1	1	1	1	1	1	1
2003-2004	1	1	1	1	1	1	0
2004-2005	1	1	1	1	2	3	1
2005-2006	0	0	0	0	0	0	0
2006-2007	1	0	0	0	1	1	0
2007-2008	0	0	1	0	0	0	1
2008-2009	0	0	0	0	0	0	0
2009-2010	0	0	1	1	1	1	1
2010-2011	1	1	0	0	0	0	0
2011-2012	0	0	1	0	0	0	0
2012-2013	1	0	1	0	0	0	0

FUENTE: Elaboración propia (2016)

Tabla 27: Estados del SDI-lluvia en la temporada de estiaje.

AÑO H.	ESTIAJE (JUN-NOV)						
	P-ÑA	RAC	CHO	SOC	CON	LET	HUAT
1973-1974	0	0	1	1	0	0	0
1974-1975	0	0	1	0	1	1	2
1975-1976	1	3	1	1	1	1	0
1976-1977	1	1	0	0	0	0	0
1977-1978	3	2	0	0	1	1	0
1978-1979	3	3	3	3	1	1	0
1979-1980	0	0	0	0	1	0	0
1980-1981	1	0	0	0	0	0	0
1981-1982	0	1	0	0	0	0	0
1982-1983	0	0	1	0	1	3	2
1983-1984	0	0	0	0	0	0	0
1984-1985	3	1	0	0	1	2	0
1985-1986	1	1	1	1	1	0	2
1986-1987	1	0	1	2	1	1	0
1987-1988	1	0	2	2	1	3	3
1988-1989	1	0	1	1	1	1	4
1989-1990	0	0	0	1	1	0	0
1990-1991	2	3	1	1	1	1	0
1991-1992	1	2	0	1	1	1	1
1992-1993	0	0	0	0	1	0	0
1993-1994	3	2	1	2	1	3	3
1994-1995	2	1	0	1	0	0	0
1995-1996	3	0	3	2	1	2	0
1996-1997	0	1	0	0	0	0	0
1997-1998	0	1	1	2	0	0	0
1998-1999	0	0	0	0	0	0	0
1999-2000	0	1	0	0	0	0	0
2000-2001	0	0	0	0	0	0	1
2001-2002	0	0	0	0	0	0	0
2002-2003	1	1	1	2	1	0	3
2003-2004	0	0	0	0	1	1	1
2004-2005	1	1	4	1	1	2	1
2005-2006	0	0	1	0	1	0	0
2006-2007	0	0	1	1	1	1	1
2007-2008	0	0	1	1	1	1	3
2008-2009	1	0	0	0	0	0	1
2009-2010	1	2	1	4	1	4	1
2010-2011	0	1	0	1	0	0	1
2011-2012	0	1	0	0	0	0	0
212-2013	0	1	0	0	0	0	0

FUENTE: Elaboración propia (2016)

Tabla 28: Estados del SDI-lluvias en la temporada año hidrológico.

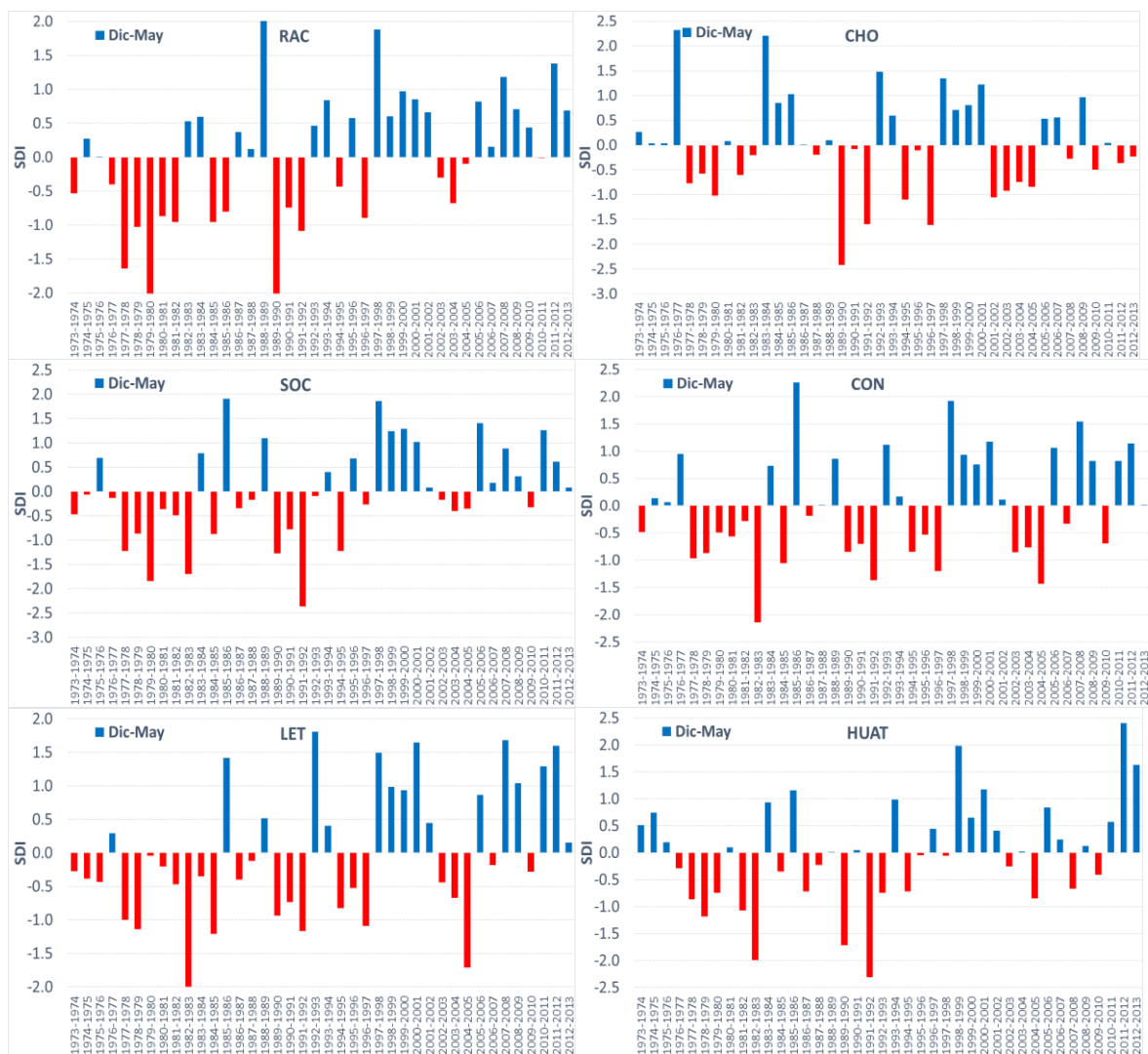
AÑO H.	AÑO HIDROLOGICO (SEP-AGO)						
	P-ÑA	RAC	CHO	SOC	CON	LET	HUAT
1973-1974	2	1	0	1	1	1	0
1974-1975	0	0	1	1	0	1	0
1975-1976	0	0	1	0	1	1	0
1976-1977	0	2	0	1	0	0	1
1977-1978	2	2	1	2	1	1	1
1978-1979	1	2	1	1	1	2	1
1979-1980	2	4	2	4	1	1	1
1980-1981	0	1	0	1	1	1	0
1981-1982	2	2	1	1	1	1	2
1982-1983	0	0	0	1	3	4	3
1983-1984	0	0	0	0	0	1	0
1984-1985	2	1	0	1	1	2	0
1985-1986	1	1	0	0	0	0	0
1986-1987	0	0	1	1	1	1	1
1987-1988	2	0	1	1	1	1	1
1988-1989	0	0	1	0	0	0	1
1989-1990	3	2	4	2	1	1	3
1990-1991	2	1	0	1	1	1	0
1991-1992	0	2	3	4	3	2	4
1992-1993	0	1	0	1	0	0	1
1993-1994	0	0	0	0	0	0	0
1994-1995	1	1	2	2	1	2	1
1995-1996	2	0	1	0	1	1	0
1996-1997	1	1	3	1	2	2	0
1997-1998	0	0	0	0	0	0	1
1998-1999	0	0	0	0	0	0	0
1999-2000	0	0	0	0	0	0	0
2000-2001	0	0	0	0	0	0	0
2001-2002	0	0	1	0	0	0	0
2002-2003	1	1	1	0	1	1	1
2003-2004	1	1	1	1	1	1	1
2004-2005	1	1	1	1	3	3	2
2005-2006	0	0	0	0	0	0	0
2006-2007	1	1	0	0	1	1	0
2007-2008	0	0	1	0	0	0	1
2008-2009	0	0	0	0	0	0	1
2009-2010	0	0	1	1	1	0	1
2010-2011	1	1	1	0	0	0	0
2011-2012	0	0	1	0	0	0	0
2012-2013	1	0	1	0	0	0	0

FUENTE: Elaboración propia (2016)

### 5.1.6.1 Duración

La **Tabla 26** muestra los SDI-lluvia de las siete cuencas reguladas de la VP para la temporada de avenidas (diciembre-mayo) del periodo de evaluación (1973-2013), donde se obtienen gráficamente representada en una serie de tiempo en la **Figuras 49**.

La **Figura 49** muestra las series del SDI-lluvias con condiciones de déficit hídrico de lluvia extrema registrado en la región VP-ZN en la estación hidrométrica RAC (Racarrumi), VP-ZC en la estaciones hidrométricas CHO (Chosica) y SOC (Socsi) y en la región VP-ZS en las estaciones hidrométricas CON (Conta), LET (Letrayoc) y HUAT (Huatiapa).

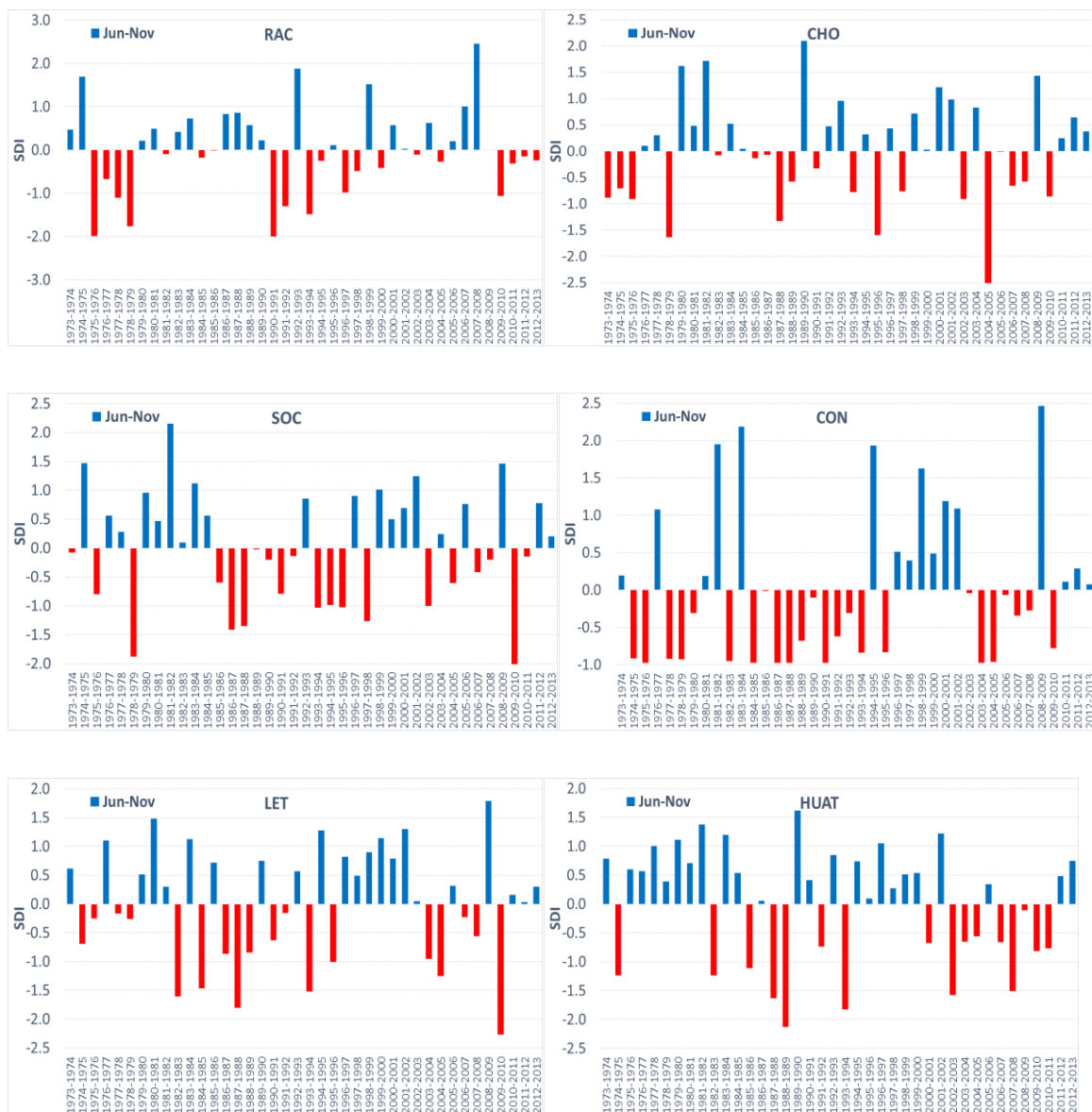


**Figura 49: Serie SDI-lluvia periodo de avenidas de la VP.**

FUENTE: Elaboración Propia (2016)

La **Tabla 27** muestra los SDI-lluvia de las cuencas reguladas de la VP para la temporada de estiaje (junio-noviembre) del periodo de evaluación (1973-2013), donde se obtienen gráficamente representada en una serie de tiempo en la **Figura 50**.

La **Figura 50** muestra las series del SDI-lluvias con condiciones de déficit hídrico extrema en la región VP-ZN en la estación hidrométrica RAC (Racarrumi), VP-ZC en la estaciones hidrométricas CHO (Chosica) y SOC (Socsi) y en la región VP-ZS en las estaciones hidrométricas CON (Conta), LET (Letrayoc) y HUAT (Huatiapa).

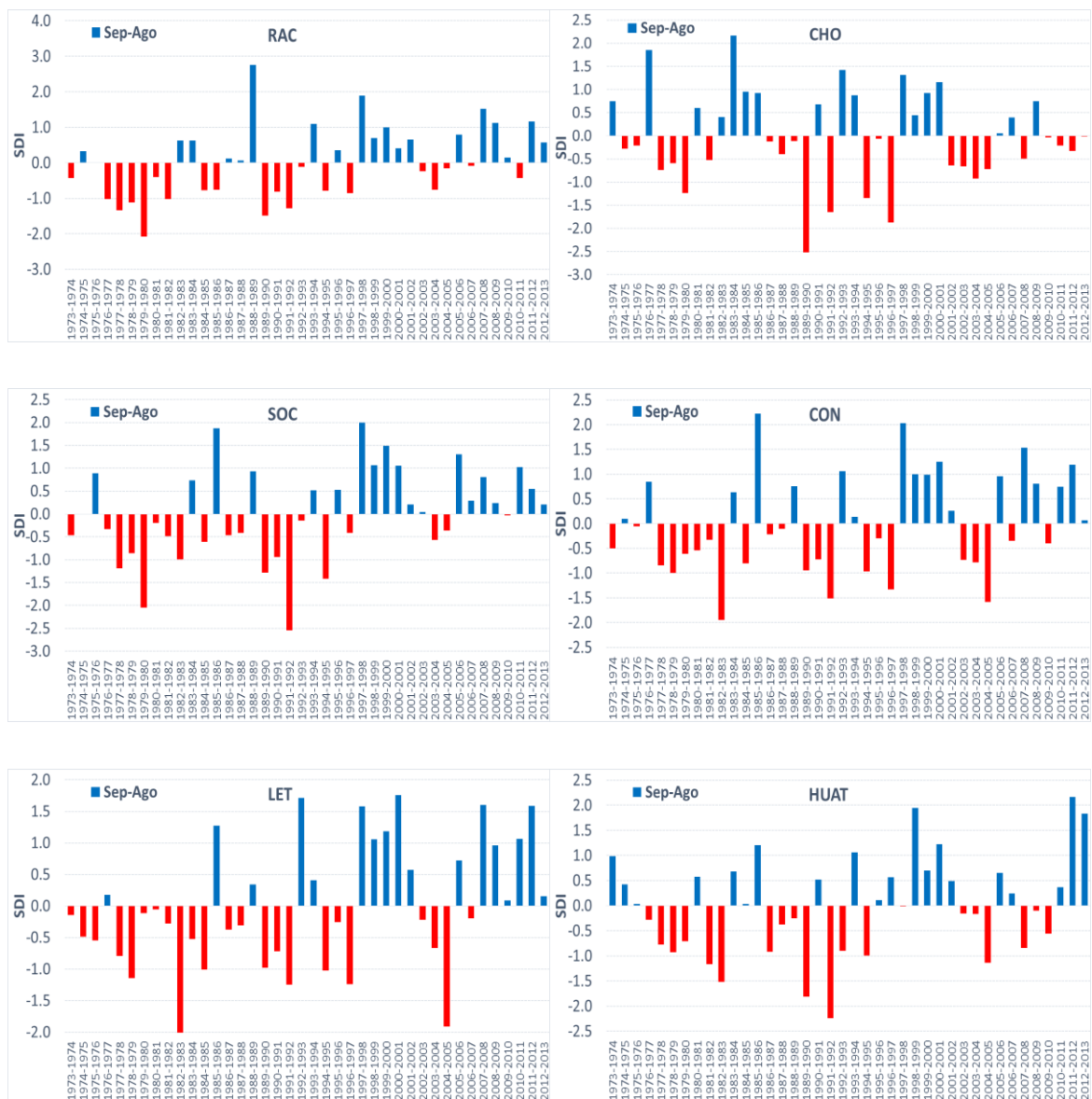


**Figura 50: Serie SDI-lluvia periodo de estiaje de la VP.**

FUENTE: Elaboración Propia (2016)

La **Tabla 28** muestra los SDI-lluvia de las cuencas reguladas de la VP para la temporada del año hidrológico (septiembre-agosto) del periodo de evaluación (1973-2013), donde se obtienen gráficamente representada en una serie de tiempo en la **Figura 51**.

La **Figura 51** muestra las series del SDI-lluvias con condiciones de déficit hídrico extrema en la región VP-ZN en la estación hidrométrica RAC (Racarrumi), VP-ZC en la estaciones hidrométricas CHO (Chosica) y SOC (Socsi) y en la región VP-ZS en las estaciones hidrométricas CON (Conta), LET (Letrayoc) y HUAT (Huatiapa).



**Figura 51: Serie SDI-lluvia periodo del año hidrológico de la VP.**

FUENTE: Elaboración Propia (2016)

### 5.1.6.2 Extensión espacial

La caracterización espacial y temporal del déficit hídrico de lluvias mediante el uso del SDI-lluvia, muestra la evolución del inicio, desarrollo y el fin de un evento seco e identifica regiones con mayor riesgo a sufrir temporadas secas lo suficientemente severas como para ocasionar un grave desequilibrio hídrico en las cuencas reguladas del VP.

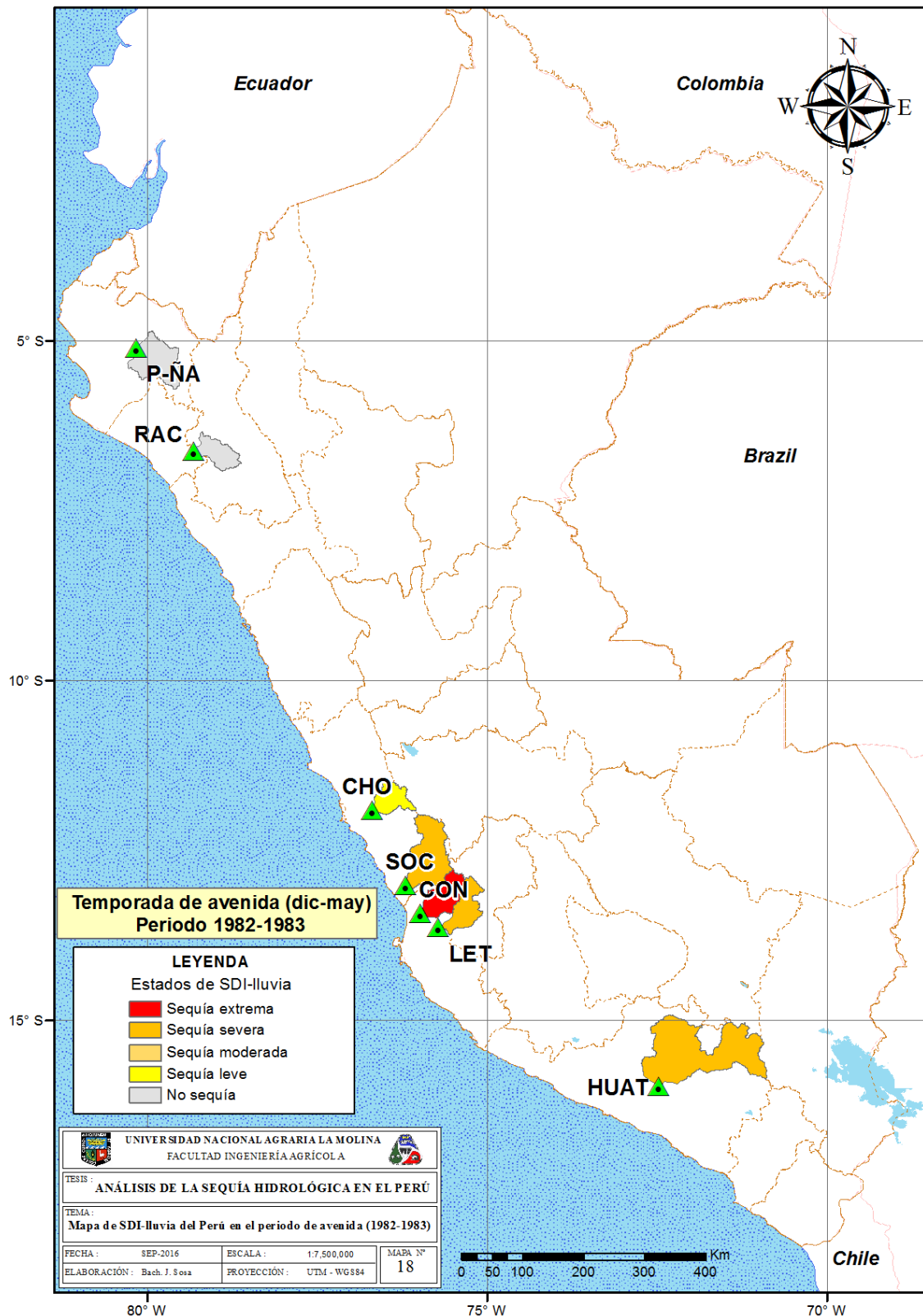
Las **Figuras 52 al 63** muestran los estados de sequía de lluvias según SDI-lluvia asociados a una coloración: verde claro para un estado de no sequía, amarillo para un estado de sequía leve, color oro para el estado de sequía moderada, naranja para el estado de sequía severa y rojo para el estado de sequía extrema. Estos representados durante los episodios ENOS 1982-1983, 1991-1992 y 1997-1998, y el evento de sequía de la campaña 1989-1990 para las temporadas (avenidas, estiaje y año hidrológico).

La **Figura 52** muestra condiciones de sequía de lluvia extrema en la estación hidrométrica CON (Conta) y sequía de lluvia entre leve a severa en las estaciones hidrométricas CHO (Chosica), SOC (Socsi), LET (Letrayoc) y HUAT (Huatiapa). Mientras que en las estaciones hidrométricas P-ÑA (Puente Ñacara) y RAC (Racarrumi) no registraron sequía de lluvia para la temporada de avenidas del periodo 1982-1983.

La **Figura 53** muestra condiciones de sequía de lluvia extrema en las estaciones hidrométricas de RAC (Racarrumi) y CHO (Chosica); sequía de lluvia entre leve a severa en resto de las estaciones hidrométricas de las cuencas reguladas de la VP para la temporada de avenidas del periodo 1989-1990.

La **Figura 54** muestra condiciones de sequía de lluvia extrema en las estaciones hidrométricas de SOC (Socsi) y HUAT (Huatiapa); sequía de lluvia entre leve a moderada en resto de las estaciones hidrométricas de las cuencas reguladas de la VP a excepción de P-ÑA (Puente Ñacara), este no registraron sequía de lluvia para la temporada de avenidas del periodo 1991-1992.

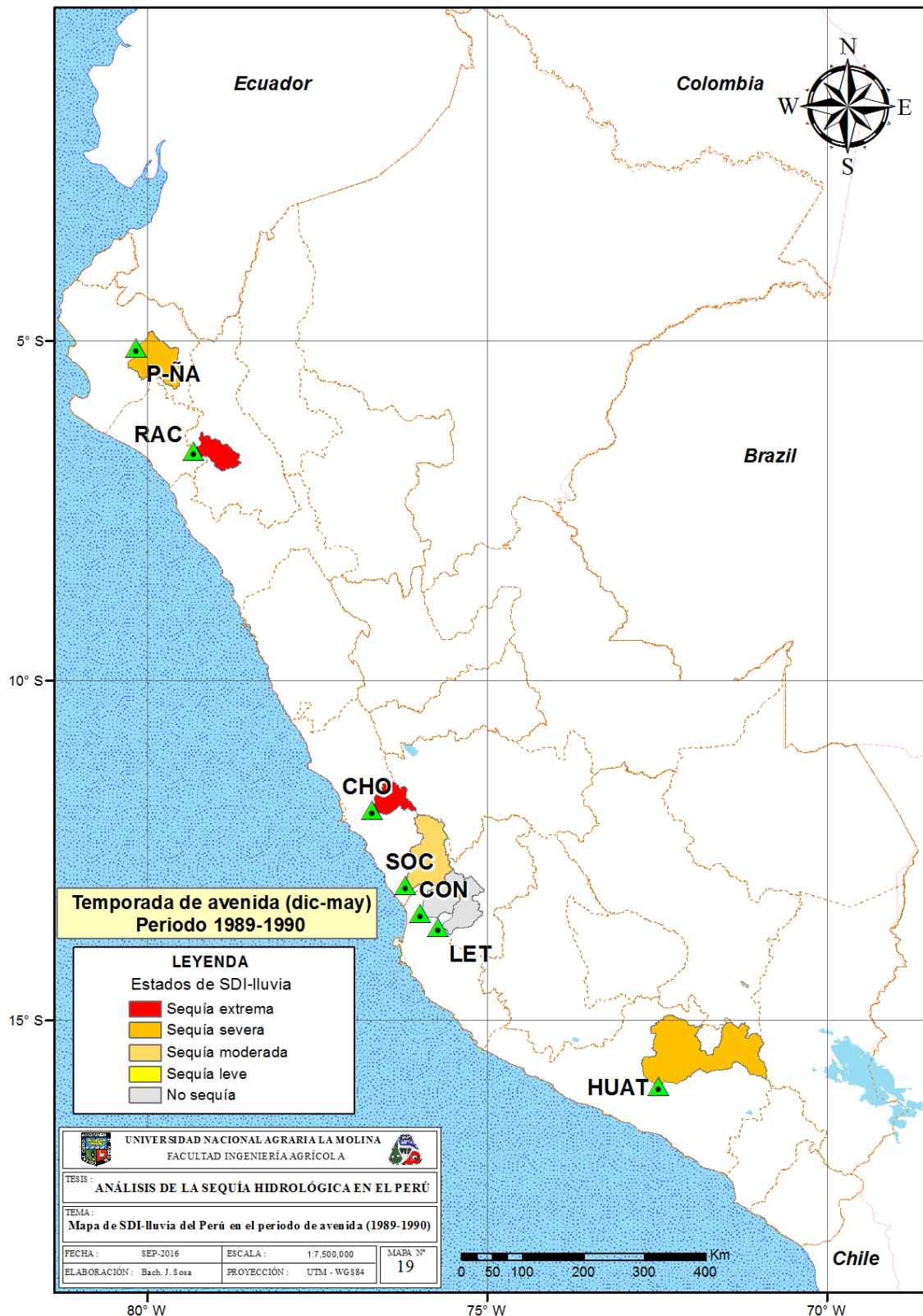
La **Figura 55** muestra condiciones de sequía de lluvia leve en la estación hidrométrica HUAT (Huatiapa) y para resto de las estaciones hidrométricas de las cuencas reguladas de la VP no registraron sequía de lluvia para la temporada de avenidas del periodo 1997-1998.



**Figura 52: Extensión espacial de los estados de sequía de lluvias según el SDI-lluvia en la temporada de avenidas del periodo 1982-1983.**

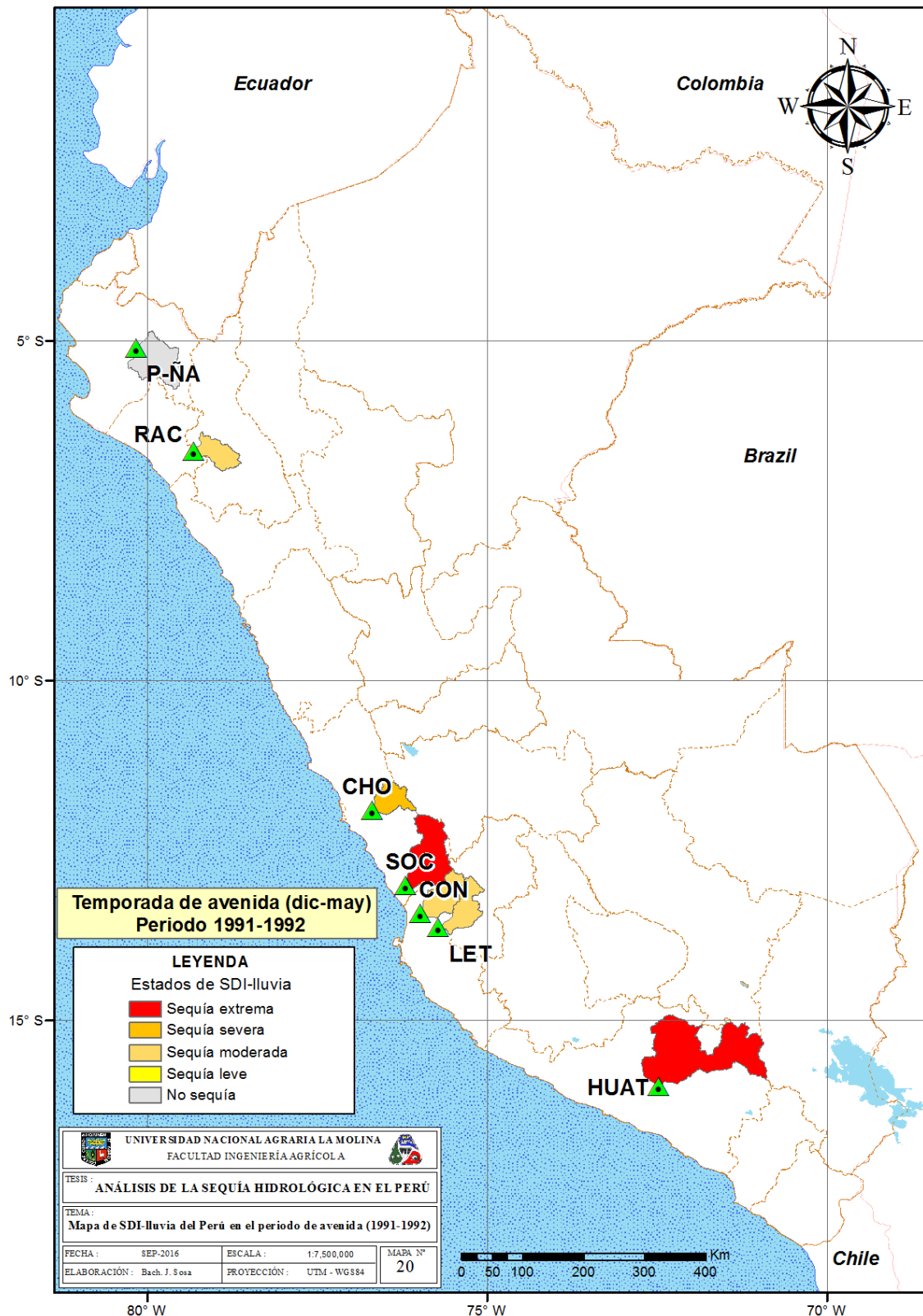
FUENTE: Elaboración propia (2016)





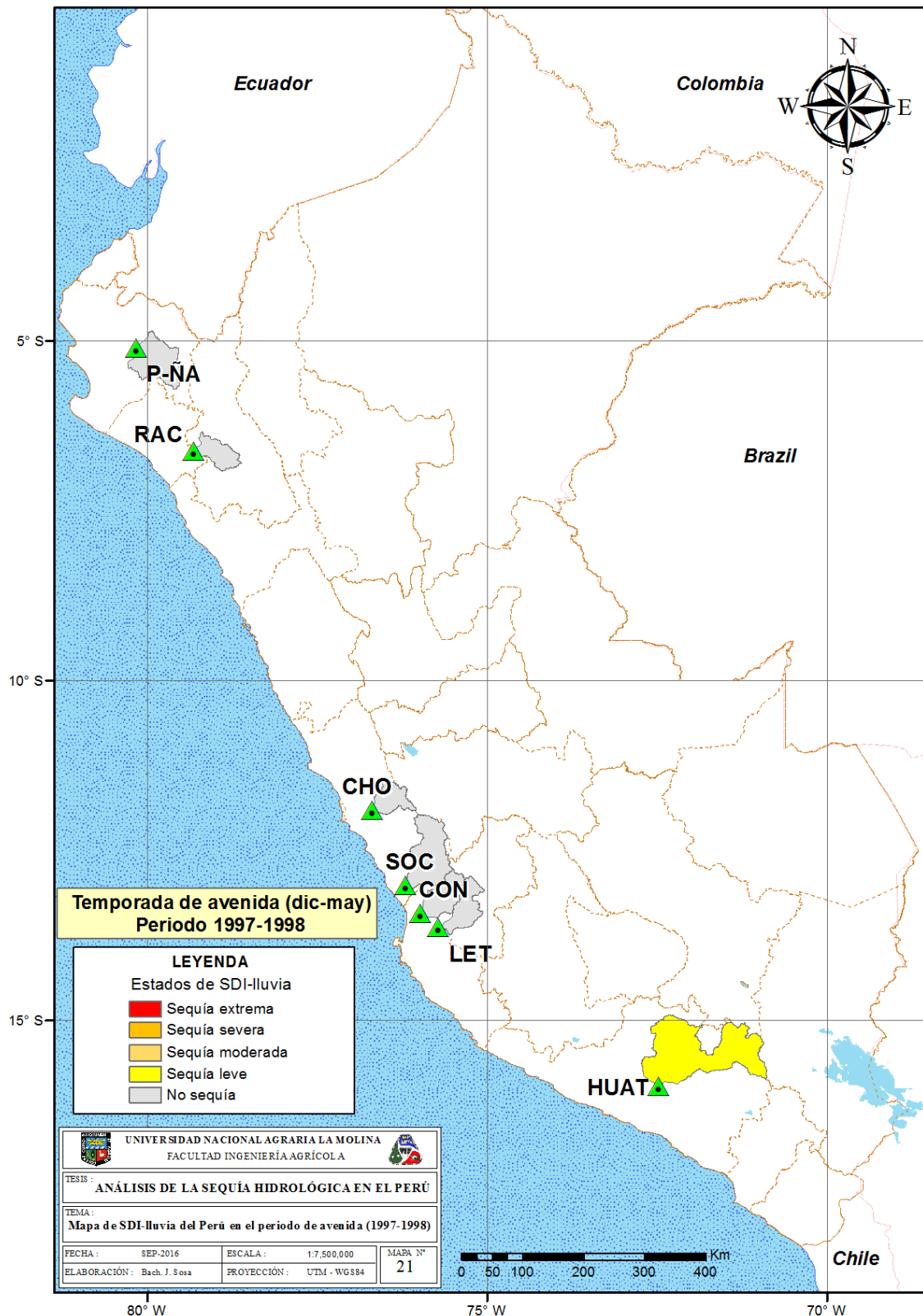
**Figura 53: Extensión espacial de los estados de sequía de lluvias según el SDI-lluvia en la temporada de avenidas del periodo 1989-1990.**

FUENTE: Elaboración propia (2016)



**Figura 54: Extensión espacial de los estados de sequía de lluvias según el SDI-lluvia en la temporada de avenidas del periodo 1991-1992.**

FUENTE: Elaboración propia (2016)



**Figura 55: Extensión espacial de los estados de sequía de lluvias según el SDI-lluvia en la temporada de avenidas del periodo 1997-1998.**

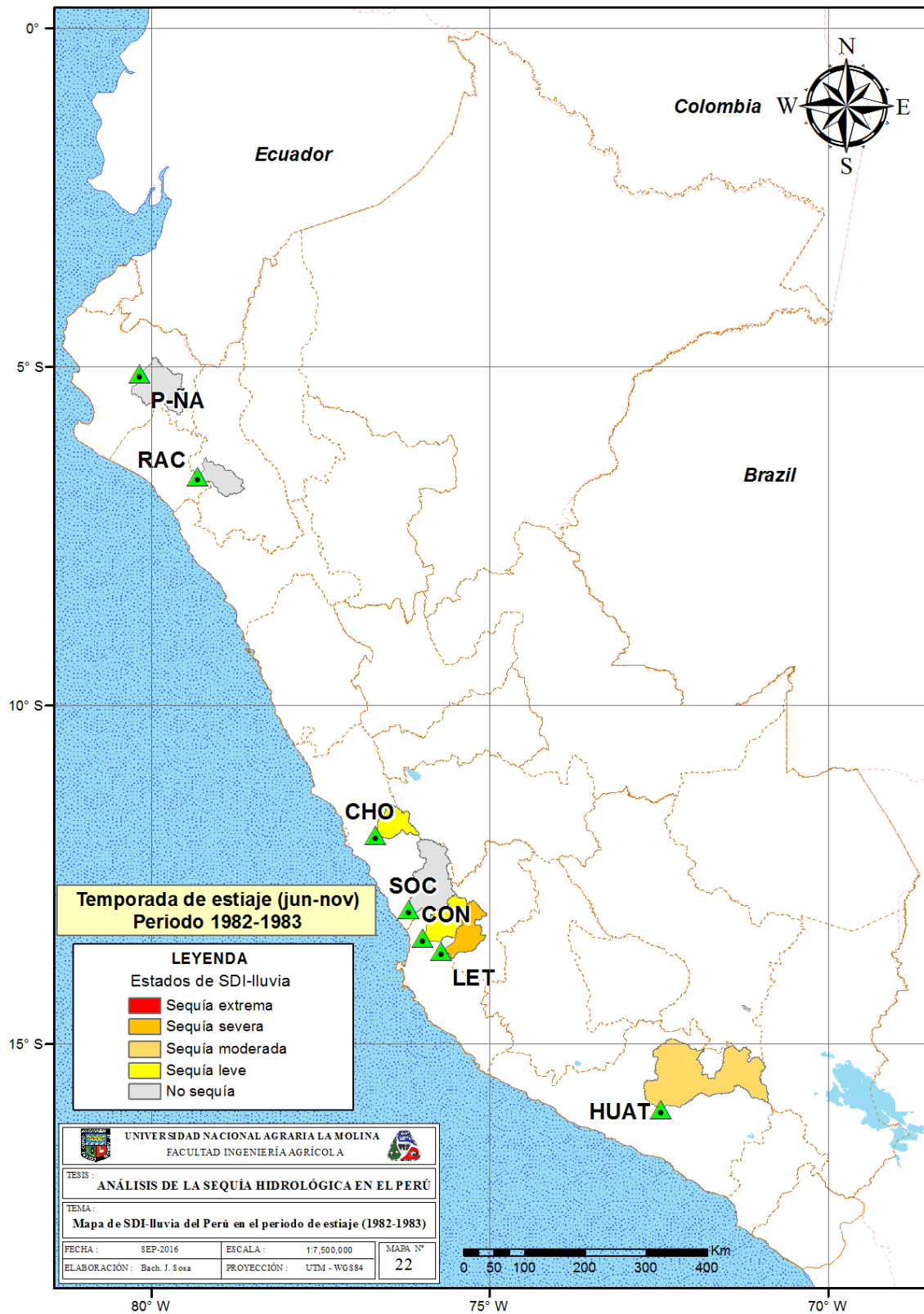
FUENTE: Elaboración propia (2016)

La **Figura 56** muestra condiciones de sequía de lluvia entre leve a severa en la mayoría de las estaciones hidrométricas de las cuencas reguladas de la VP a excepción de P-ÑA (Puente Ñacara), RAC (Racarrumi) y SOC (Socsi) estos no registraron sequía de lluvia para la temporada de estiaje del periodo 1982-1983.

La **Figura 57** muestra condiciones de sequía de lluvia leve en las estaciones hidrométricas SOC (Socsi) y CON (Conta) de las cuencas reguladas de la VP. Sin embargo en el resto de estaciones hidrométricas no registraron sequía de lluvia para la temporada de estiaje del periodo 1989-1990.

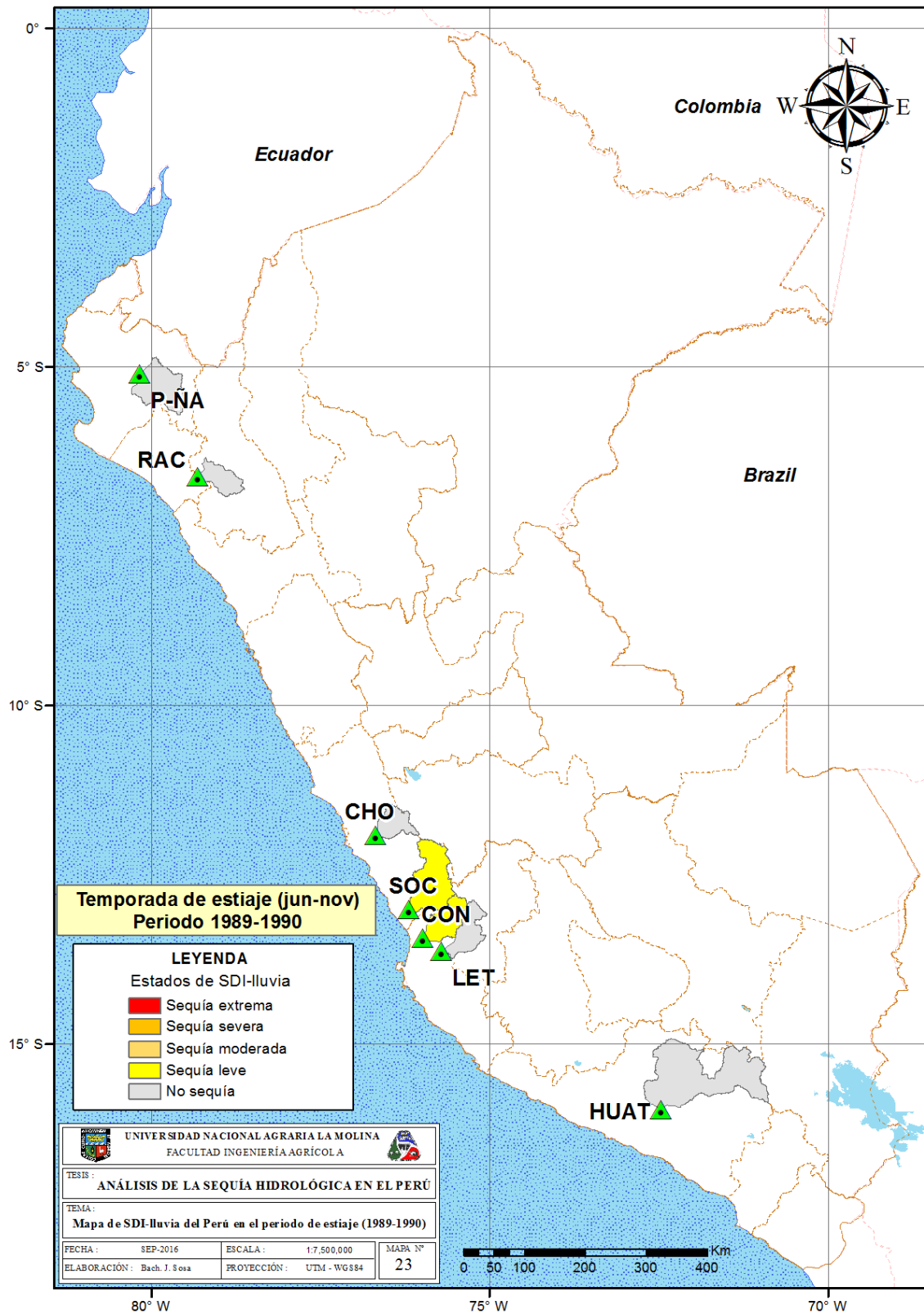
La **Figura 58** muestra condiciones de sequía de lluvia entre leve a moderada en la mayoría de las estaciones hidrométricas de las cuencas reguladas de la VP a excepción de CHO (Chosica), este no registra sequía de lluvia para la temporada de estiaje del periodo 1991-1992.

La **Figura 59** muestra condiciones de sequía de lluvia leve en las estaciones hidrométricas RAC (Racarrumi), CHO (Chosica) y SOC (Socsi) de las cuencas reguladas de la VP; sin embargo en el resto de estaciones hidrométricas no registraron sequía de lluvia para la temporada de estiaje del periodo 1997-1998.



**Figura 56: Extensión espacial de los estados de sequía de lluvias según el SDI-lluvia en la temporada de estiaje del periodo 1982-1983.**

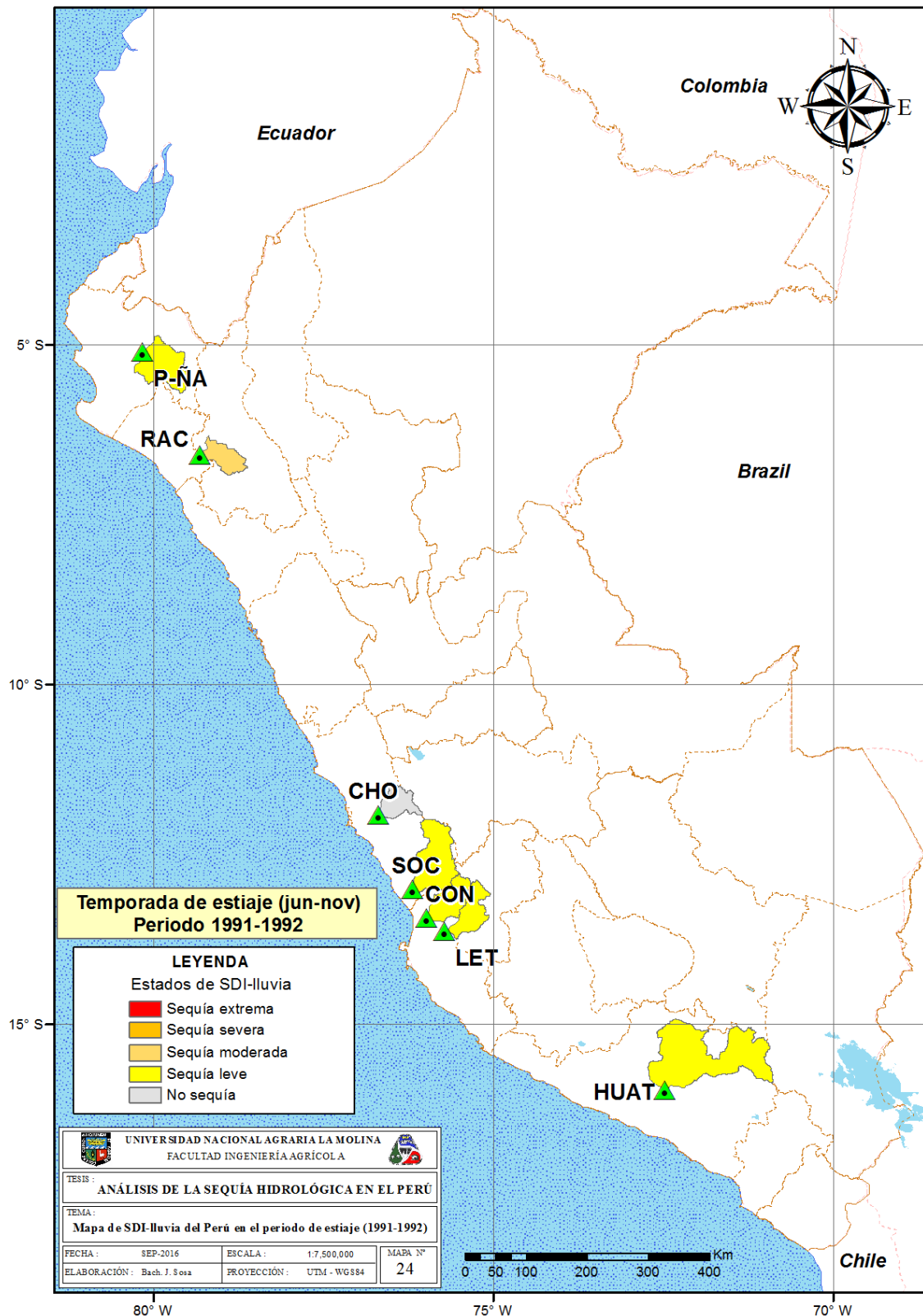
FUENTE: Elaboración propia (2016)



**Figura 57: Extensión espacial de los estados de sequía de lluvias según el SDI-lluvia en la temporada de estiaje del periodo 1989-1990.**

FUENTE: Elaboración propia (2016)





**Figura 58: Extensión espacial de los estados de sequía de lluvias según el SDI-lluvia en la temporada de estiaje del periodo 1991-1992.**

FUENTE: Elaboración propia (2016)



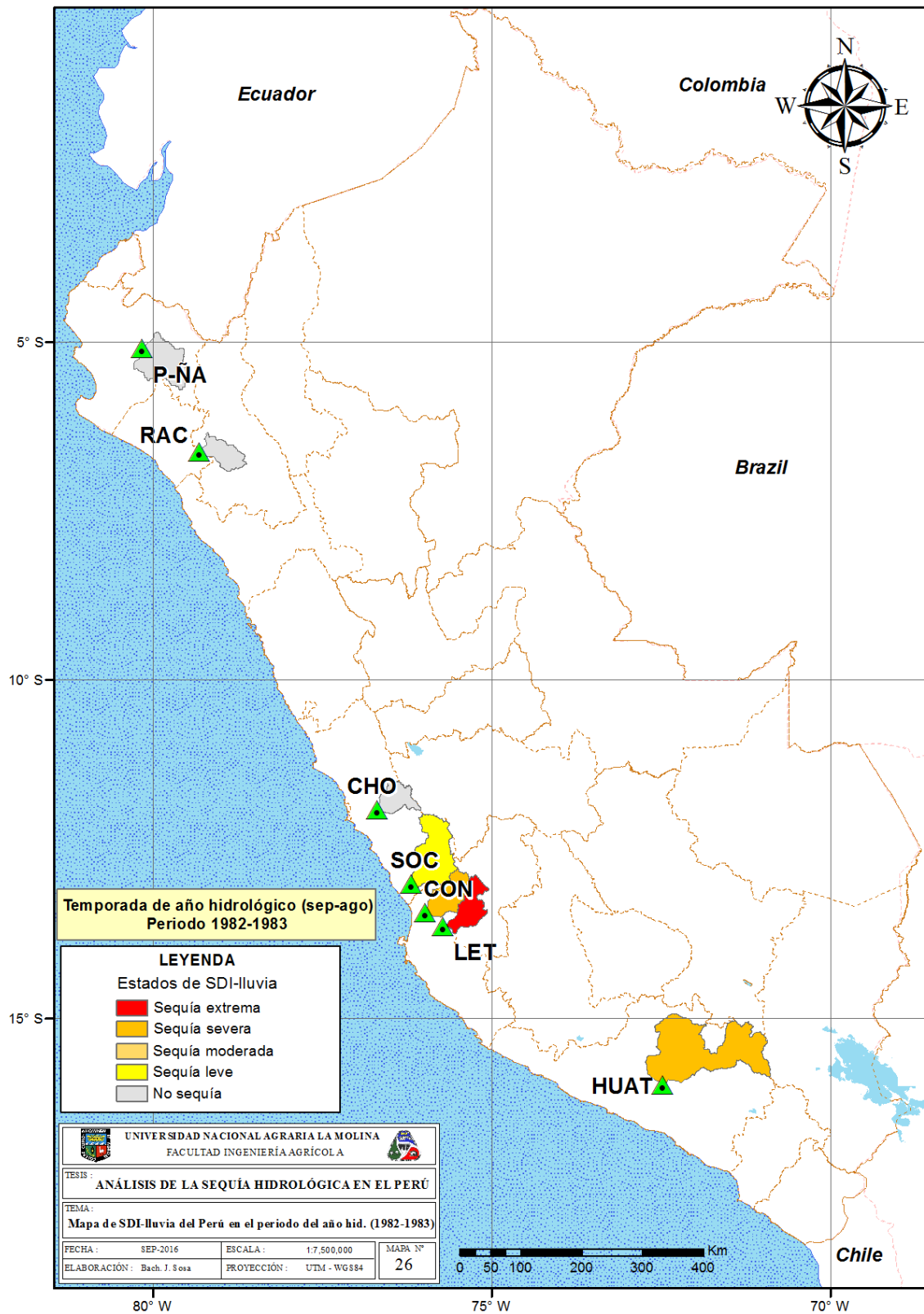


La **Figura 60** muestra condiciones de sequía de lluvia extrema en la estación hidrométrica LET (Letrayoc) y sequía de lluvia entre leve a severa en las estaciones hidrométricas SOC (Socsi), CON (Conta) y HUAT (Huatiapa). Mientras que en las estaciones hidrométricas P-ÑA (Puente Ñacara), RAC (Racarrumi) y CHO (Chosica) no registraron sequía de lluvia para la temporada del año hidrológico del periodo 1982-1983.

La **Figura 61** muestra condiciones de sequía de lluvia extrema en la estación hidrométrica CHO (Chosica) y sequía de lluvia entre leve a severa en resto de las estaciones hidrométricas para la temporada del año hidrológico del periodo 1989-1990.

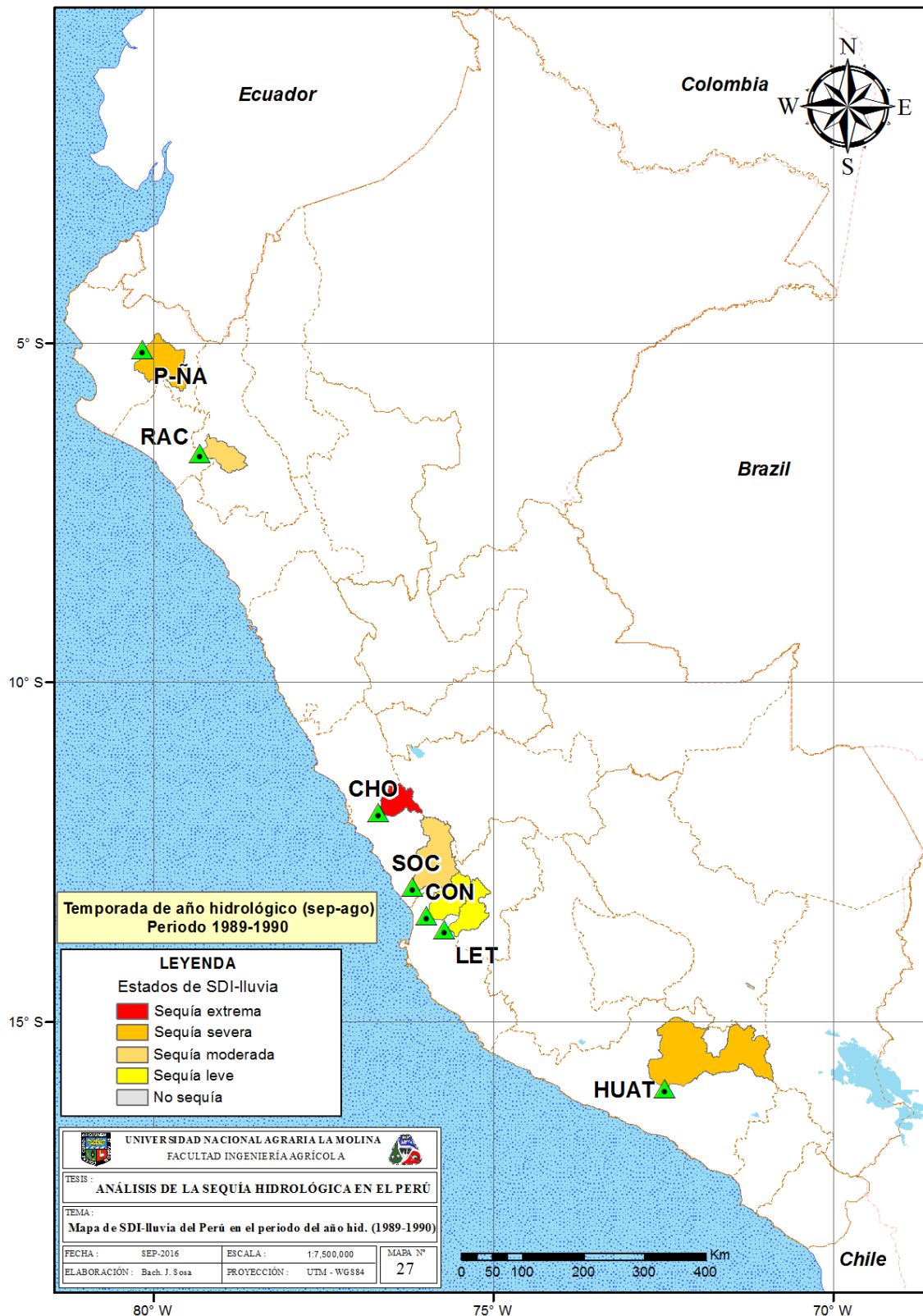
La **Figura 62** muestra condiciones de sequía de lluvia extrema en las estaciones hidrométricas SOC (Socsi) y HUAT (Huatiapa); mientras sequía de lluvia entre moderada a severa en resto de las estaciones hidrométricas a excepción de P-ÑA (Puente Ñacara), este no registra sequía de lluvia para la temporada del año hidrológico del periodo 1991-1992.

La **Figura 63** muestra condiciones de sequía de lluvia leve en la estación hidrométrica HUAT (Huatiapa). Mientras en resto de las estaciones hidrométricas no registraron sequía de lluvia para la temporada del año hidrológico del periodo 1997-1998.



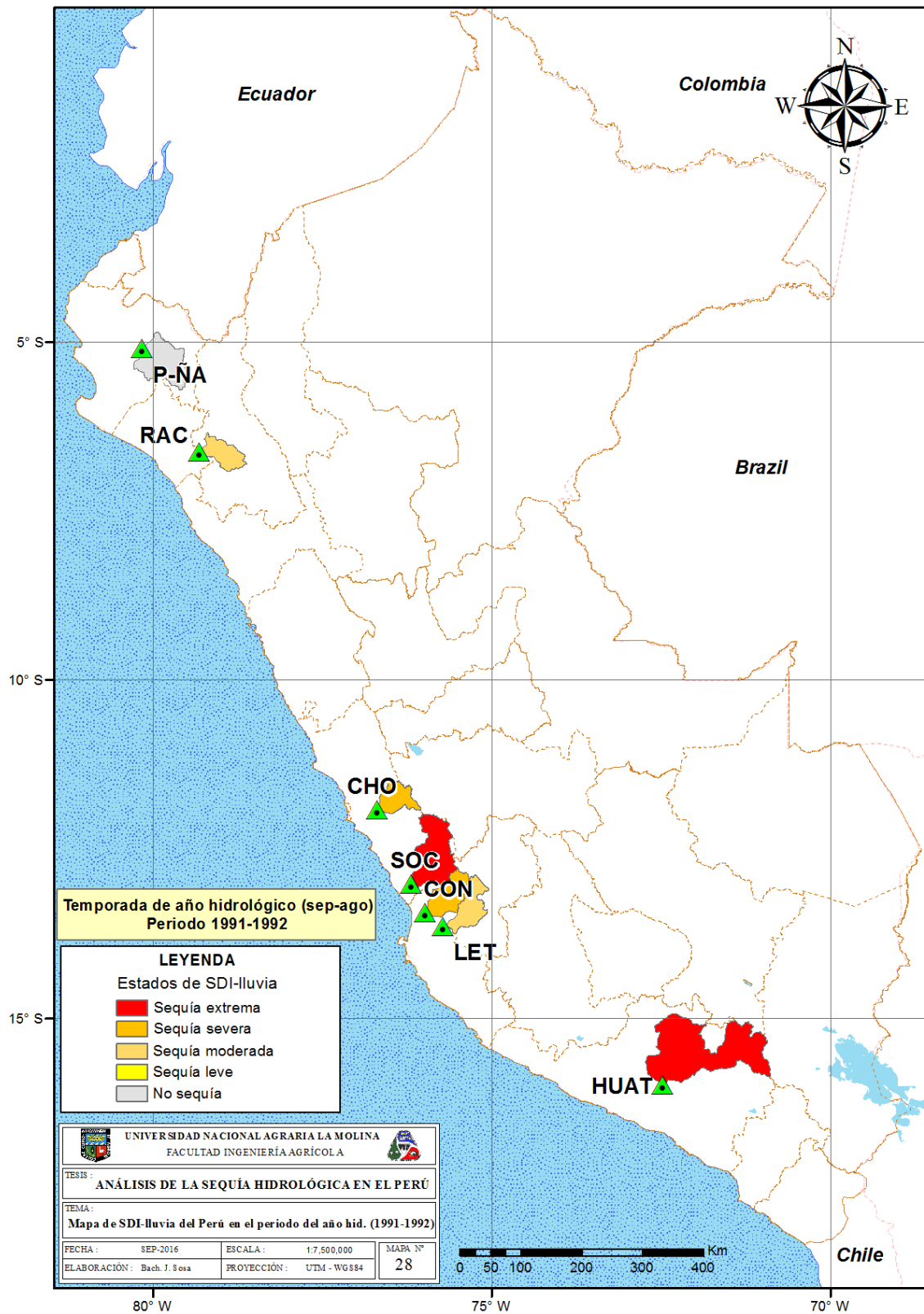
**Figura 60: Extensión espacial de los estados de sequía de lluvias según el SDI-lluvia en la temporada del año hidrológico del periodo 1982-1983.**

FUENTE: Elaboración propia (2016)



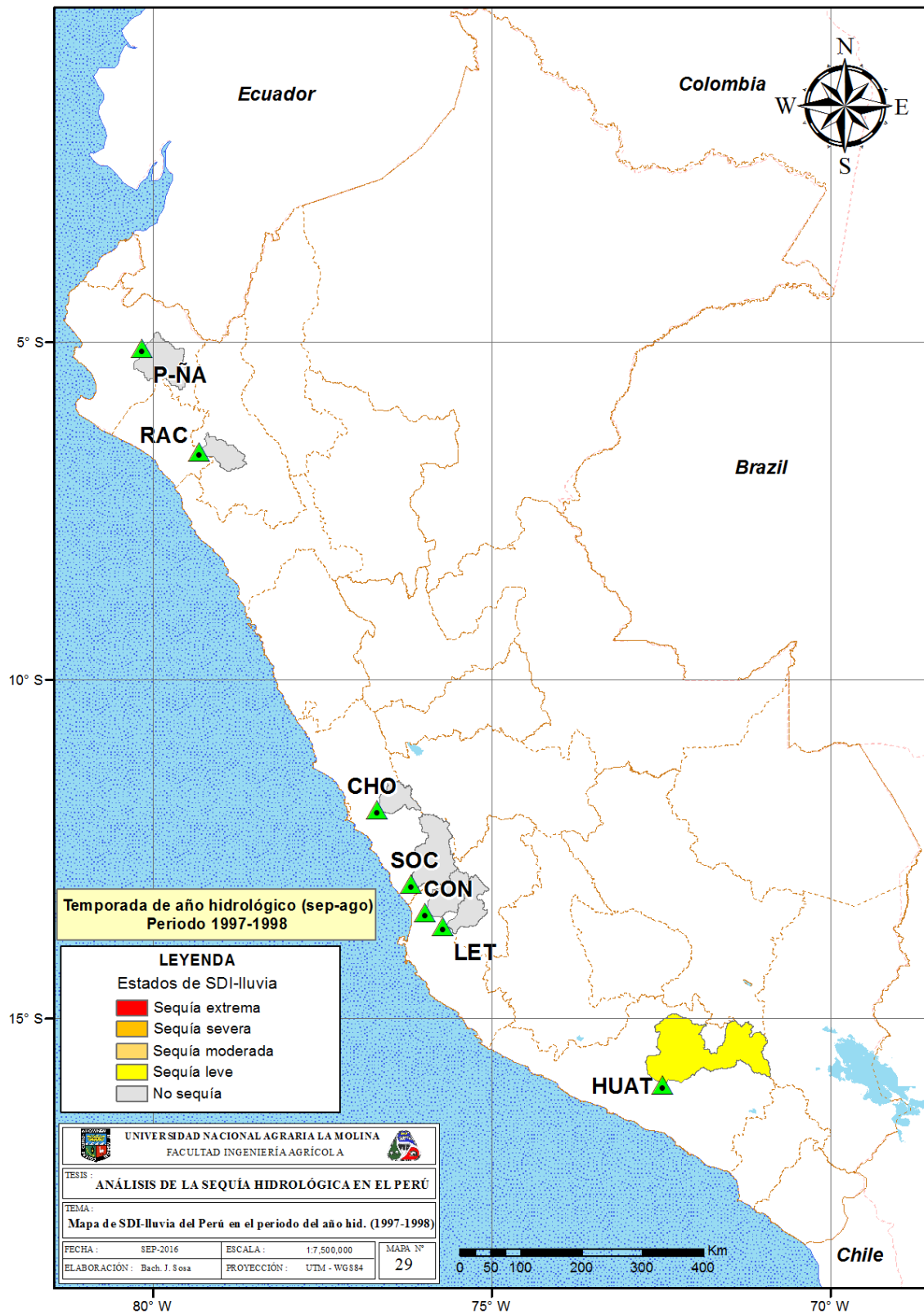
**Figura 61: Extensión espacial de los estados de sequía de lluvias según el SDI-lluvia en la temporada del año hidrológico del periodo 1989-1990.**

FUENTE: Elaboración propia (2016)



**Figura 62: Extensión espacial de los estados de sequía de lluvias según el SDI-lluvia en la temporada del año hidrológico del periodo 1991-1992.**

FUENTE: Elaboración propia (2016)



**Figura 63: Extensión espacial de los estados de sequía de lluvias según el SDI-lluvia en la temporada del año hidrológico del periodo 1997-1998.**

FUENTE: Elaboración propia (2016)

### 5.1.7 Análisis comparativo del SDI y SDI-lluvia

El análisis comparativo entre el SDI y el SDI-lluvia tiene la finalidad de comprobar una relación entre la sequía hidrológica y la sequía de lluvia encontrada en el análisis de sus respectivas variables caudal y lluvia respectivamente en el mismo periodo de evaluación. Para tal finalidad se optó en realizar el análisis comparativo en siete cuencas reguladas de la VP puesto que por efectos de la antropización estas cuencas quedan expuestas a la manipulación basada a una regla de operación de embalses.

En el **Anexo 7** se muestran los cuadros comparativos de estados de sequía hidrológica según el SDI y los estados de sequía de lluvia según el SDI-lluvia para las siete cuencas reguladas de la VP en los periodos de avenidas (diciembre-mayo), estiaje (junio-noviembre) y año hidrológico (septiembre-agosto) del periodo 1973-2013.

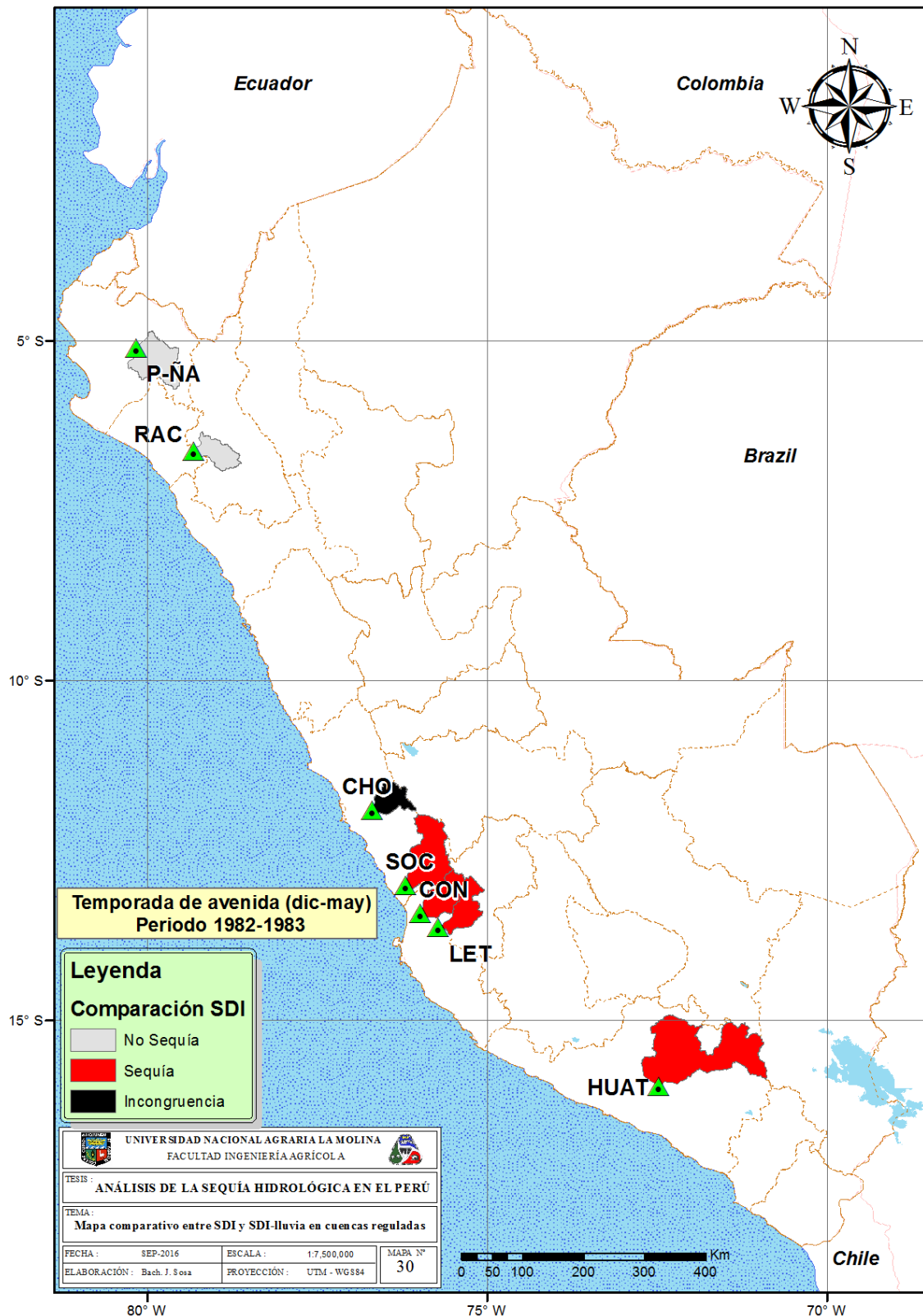
Las **Figuras del 64 al 75** muestran el análisis comparativo entre el SDI y SDI-lluvia de siete cuencas reguladas de la VP donde se clasificaron en tres categorías comparativas el primero con incidencia de sequía de ambas variables de color rojo, el segundo con incidencia de no sequía hidrológica en ambas variables de color plomo y la tercera clasificación como una incongruencia de las variables analizadas de color negro.

La **Figura 64** muestra condiciones de sequía de lluvia e hidrológica en las estaciones hidrométricas SOC (Socsi), CON (Conta), LET (Letrayoc) y HUAT (Huatiapa). Sin embargo no se registraron sequías ni de lluvia ni hidrológica en las estaciones hidrométricas P-ÑA (Puente Ñacara) y RAC (Racarrumi). Mientras que en la estación hidrométrica CHO (Chosica) hay una incongruencia para la temporada de avenidas del periodo 1982-1983.

La **Figura 65** muestra condiciones de sequía de lluvia e hidrológica en todas las estaciones hidrométricas para la temporada de avenidas del periodo 1989-1990.

La **Figura 66** muestra condiciones de sequía de lluvia e hidrológica en la mayoría de las estaciones hidrométricas a excepción de P-ÑA (Puente Ñacara), este registra una incongruencia para la temporada de avenidas del periodo 1991-1992.

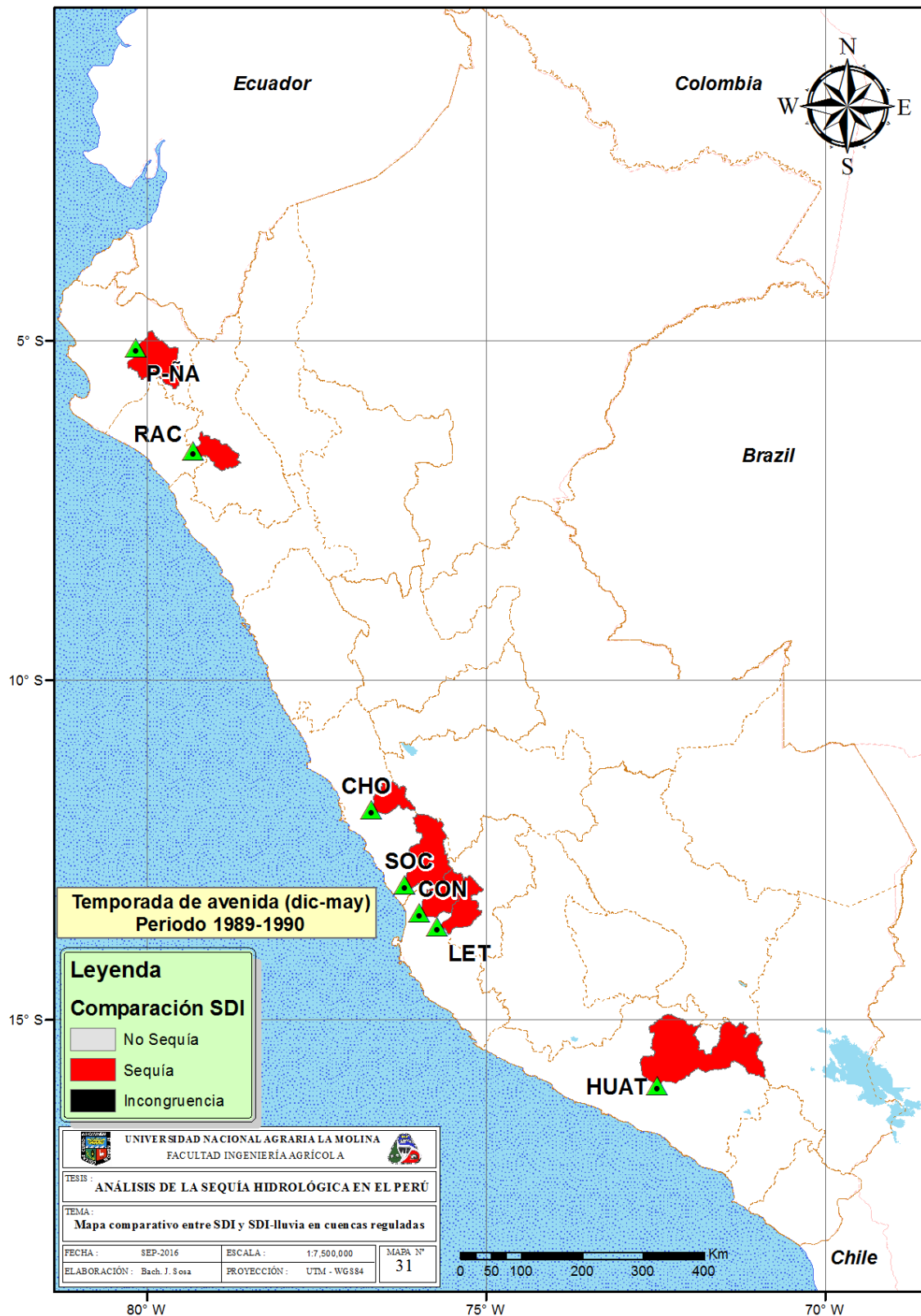
La **Figura 67** muestra condiciones de no sequía de lluvia ni hidrológica en la mayoría de las estaciones hidrométricas a excepción de HUAT (Huatiapa), este registra una incongruencia para la temporada de avenidas del periodo 1997-1998.



**Figura 64: Mapa comparativo entre SDI y SDI-lluvia en la temporada de avenidas del periodo 1982-1983.**

FUENTE: Elaboración propia (2016)

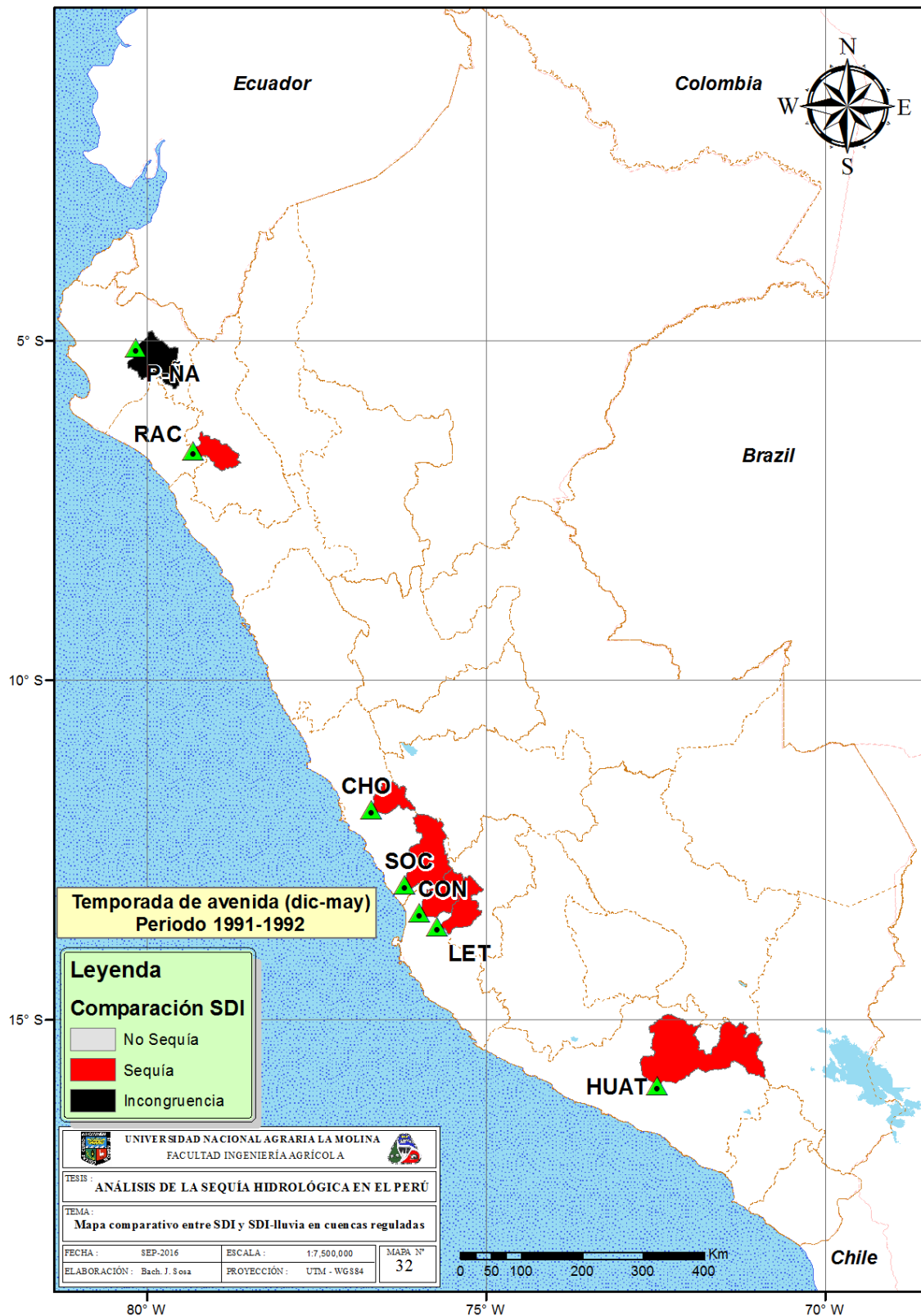




**Figura 65: Mapa comparativo entre SDI y SDI-lluvia en la temporada de avenidas del periodo 1989-1990.**

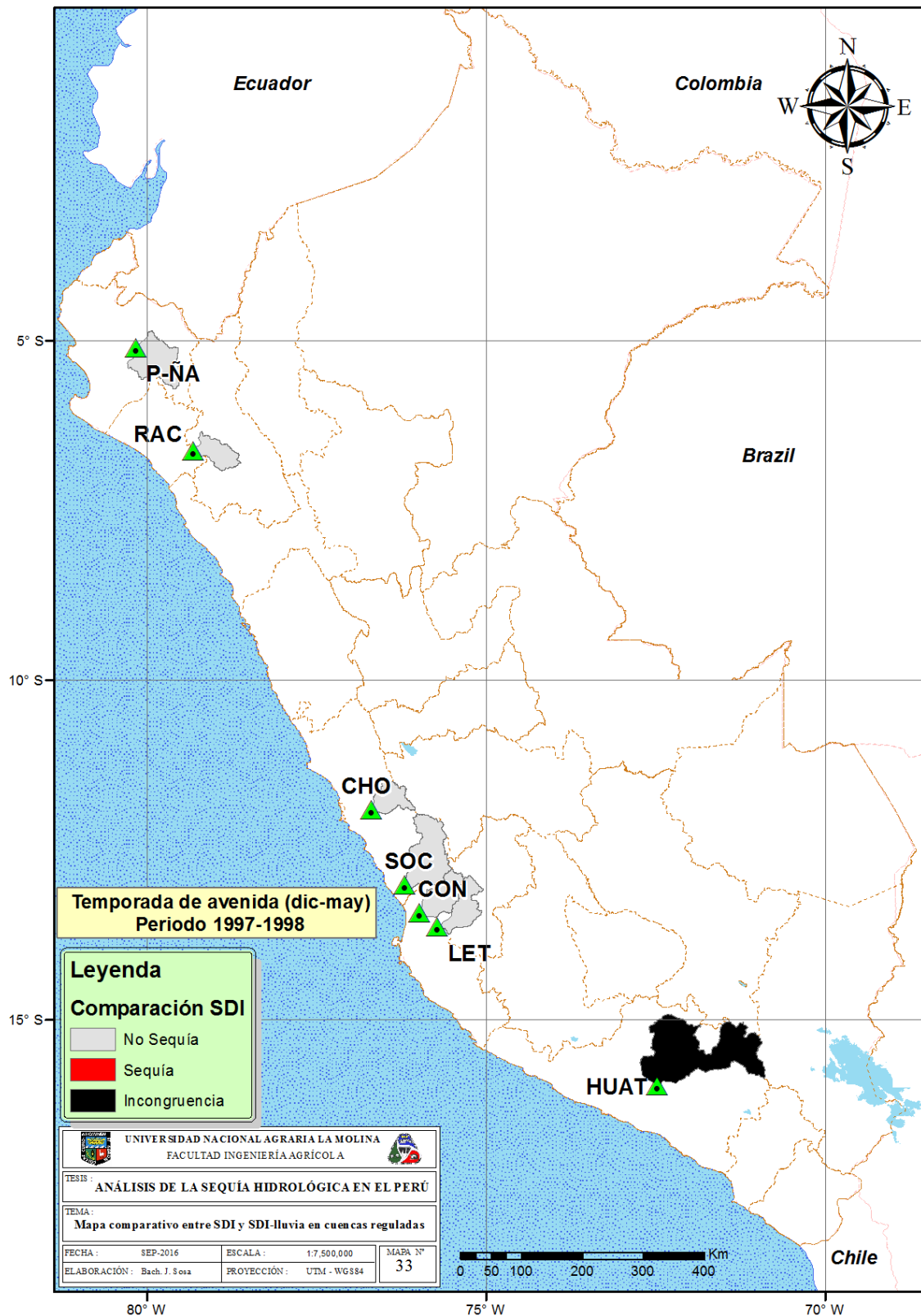
FUENTE: Elaboración propia (2016)





**Figura 66: Mapa comparativo entre SDI y SDI-lluvia en la temporada de avenidas del periodo 1991-1992.**

FUENTE: Elaboración propia (2016)



**Figura 67: Mapa comparativo entre SDI y SDI-lluvia en la temporada de avenidas del periodo 1997-1998.**

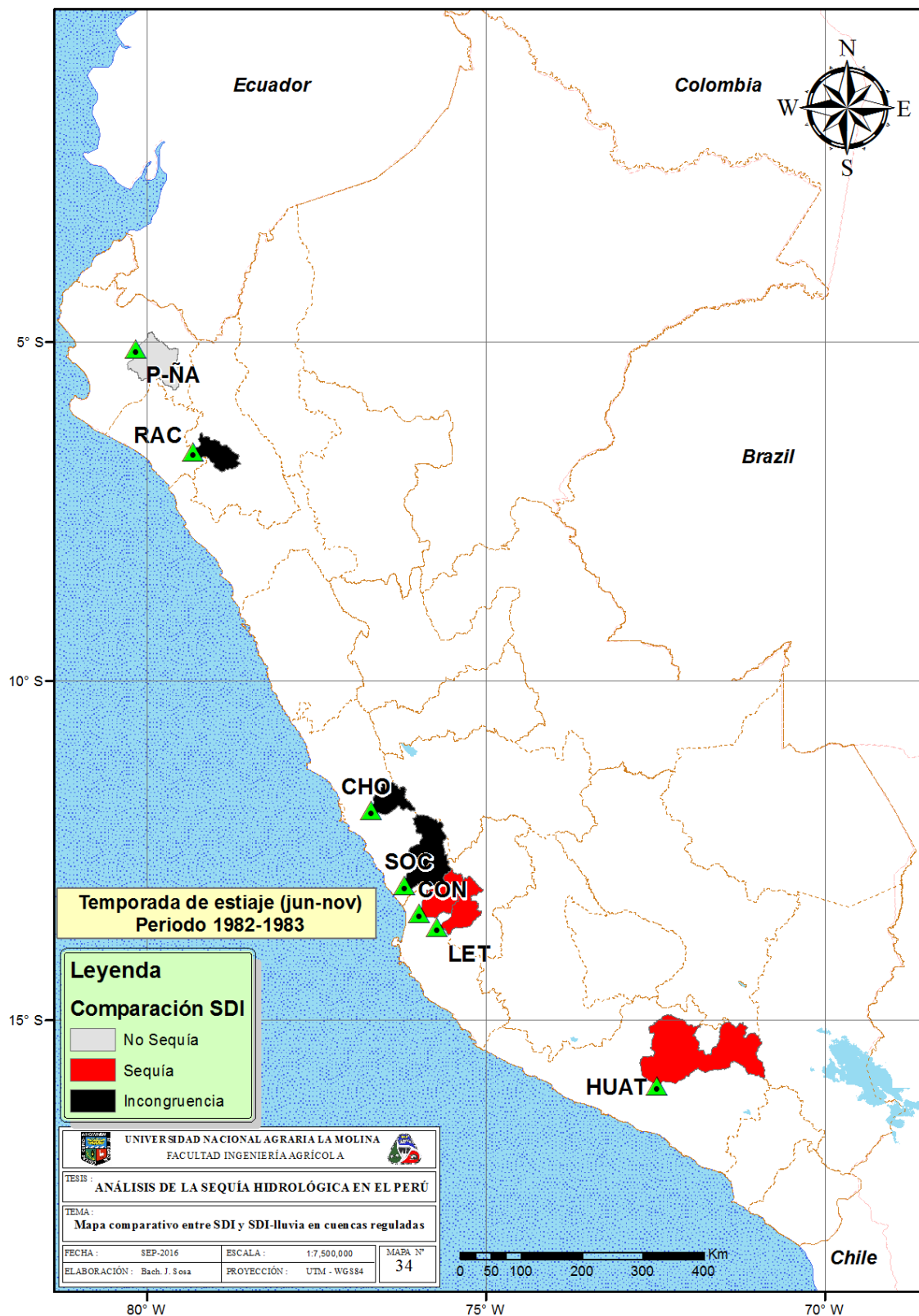
FUENTE: Elaboración propia (2016)

La **Figura 68** muestra condiciones de sequía de lluvia e hidrológica en las estaciones hidrométricas CON (Conta), LET (Letrayoc) y HUAT (Huatiapa). Sin embargo no se registraron sequías ni de lluvia ni hidrológica en la estación hidrométrica P-ÑA (Puente Ñacara). Mientras que en las estaciones hidrométricas RAC (Racarrumi), CHO (Chosica) y SOC (Socsi) registran incongruencias para la temporada de estiaje del periodo 1982-1983.

La **Figura 69** muestra condiciones de sequía de lluvia e hidrológica en las estaciones hidrométricas SOC (Socsi) y CON (Conta). Sin embargo no se registraron sequías ni de lluvia ni hidrológica en las estaciones hidrométricas RAC (Racarrumi) y HUAT (Huatiapa). Mientras que en las estaciones hidrométricas P-ÑA (Puente Ñacara), CHO (Chosica) y LET (Letrayoc) hay incongruencias para la temporada de estiaje del periodo 1989-1990.

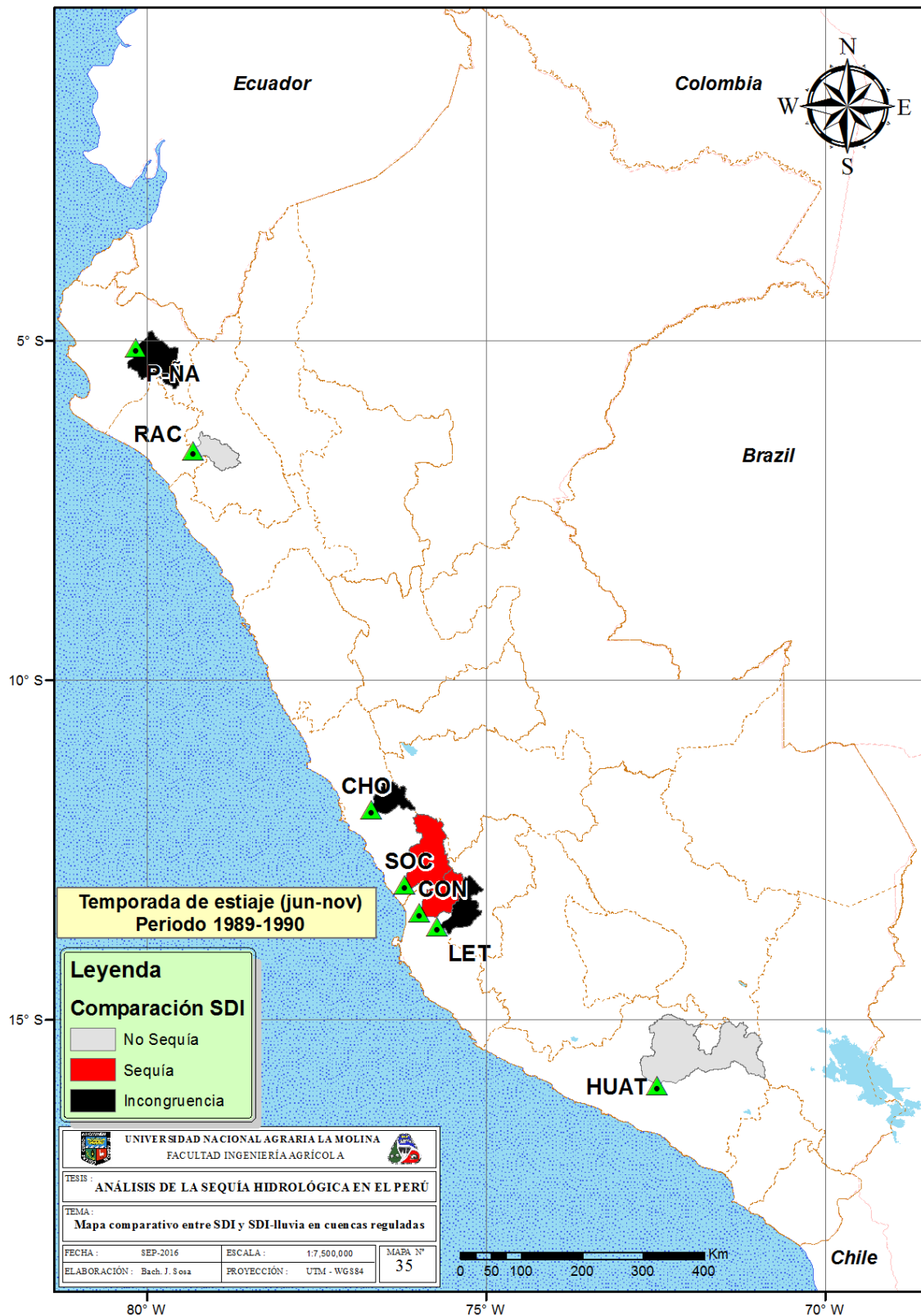
La **Figura 70** muestra condiciones de sequía de lluvia e hidrológica en la mayoría de las estaciones hidrométricas a excepción de CHO (Chosica) y LET (Letrayoc), estos registraron incongruencias para la temporada de estiaje del periodo 1991-1992.

La **Figura 71** muestra condiciones de sequía de lluvia e hidrológica en las estaciones hidrométricas RAC (Racarrumi) y SOC (Socsi). Sin embargo no se registraron sequías ni de lluvia ni hidrológica en las estaciones hidrométricas P-ÑA (Puente Ñacara), CON (Conta) y LET (Letrayoc). Mientras que en las estaciones hidrométricas CHO (Chosica) y HUAT (Huatiapa) muestran incongruencias para la temporada de estiaje del periodo 1997-1998.



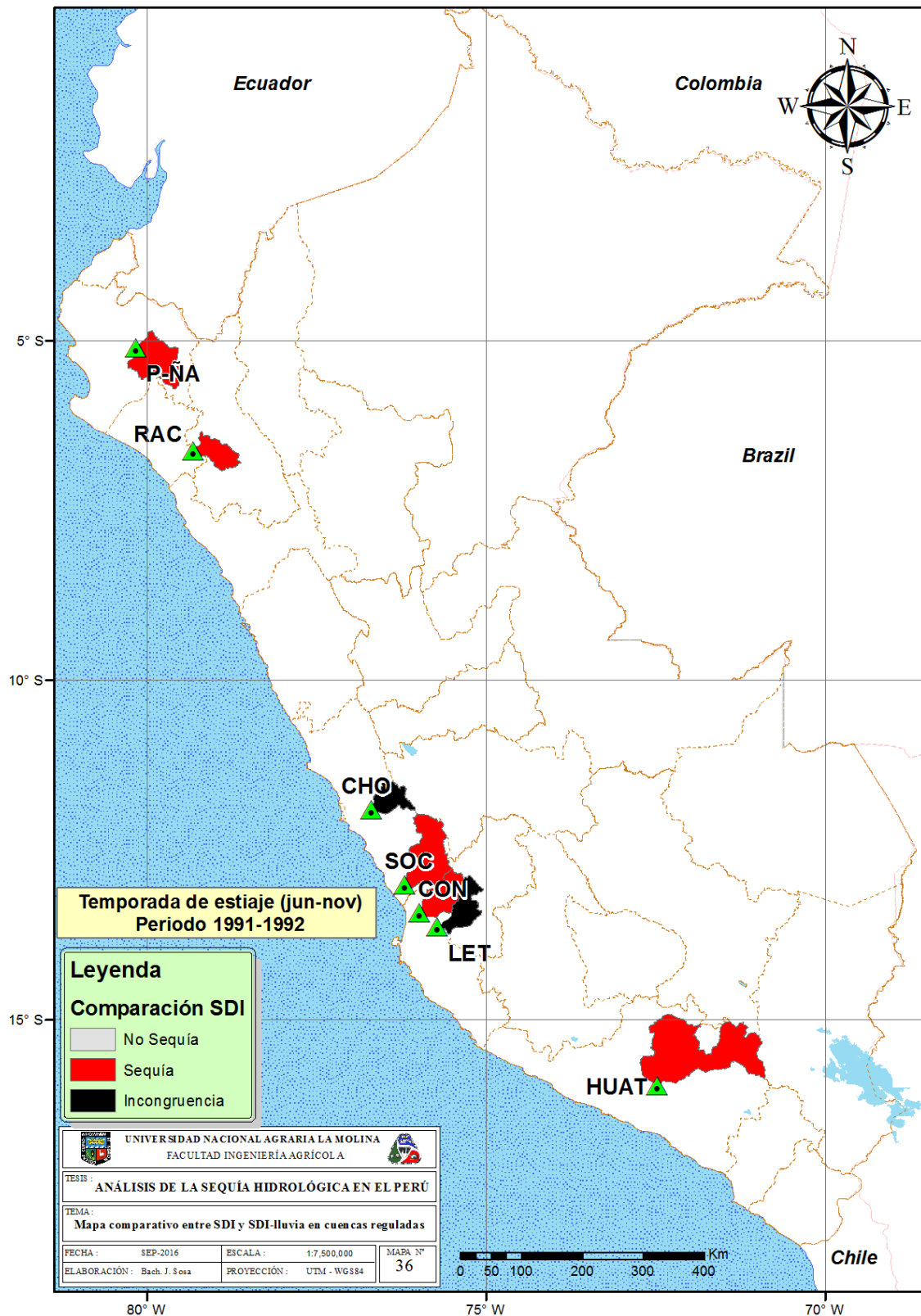
**Figura 68: Mapa comparativo entre SDI y SDI-lluvia en la temporada de estiaje del periodo 1982-1983.**

FUENTE: Elaboración propia (2016)



**Figura 69: Mapa comparativo entre SDI y SDI-lluvia en la temporada de estiaje del periodo 1989-1990.**

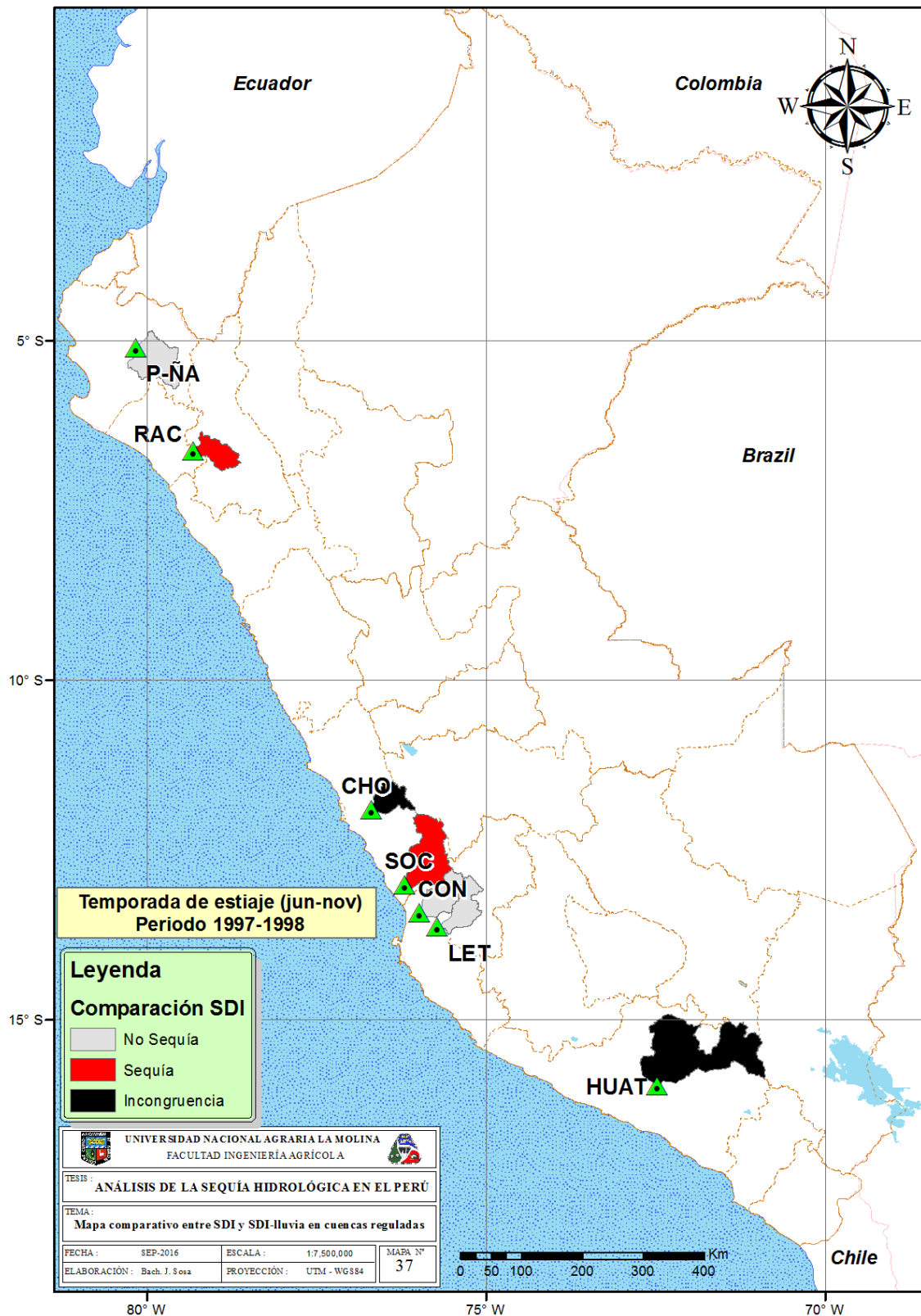
FUENTE: Elaboración propia (2016)



**Figura 70: Mapa comparativo entre SDI y SDI-lluvia en la temporada de estiaje del periodo 1991-1992.**

FUENTE: Elaboración propia (2016)





**Figura 71: Mapa comparativo entre SDI y SDI-lluvia en la temporada de estiaje del periodo 1997-1998.**

FUENTE: Elaboración propia (2016)

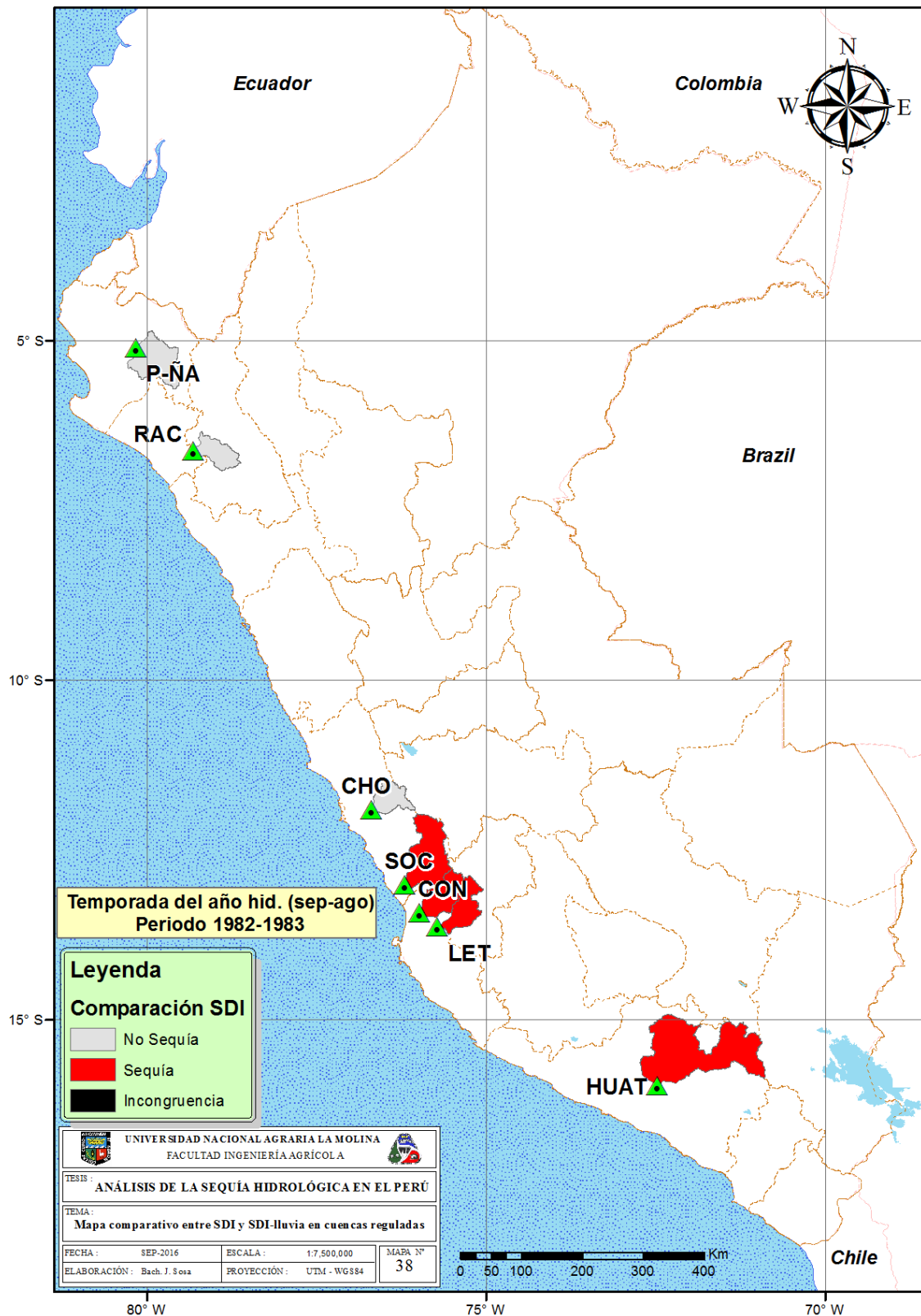
La **Figura 72** muestra condiciones de sequía de lluvia e hidrológica en las estaciones hidrométricas SOC, CON, LET y HUAT. Sin embargo no se registraron sequías ni de lluvia ni hidrológica en las estaciones hidrométricas P-ÑA, RAC y CHO para la temporada del año hidrológico del periodo 1982-1983.

La **Figura 73** muestra condiciones de sequía de lluvia e hidrológica en todas las estaciones hidrométricas para la temporada del año hidrológico del periodo 1989-1990.

La **Figura 74** muestra condiciones de sequía de lluvia e hidrológica en la mayoría de las estaciones hidrométricas a excepción de P-ÑA, este registra incongruencias para la temporada del año hidrológico del periodo 1991-1992.

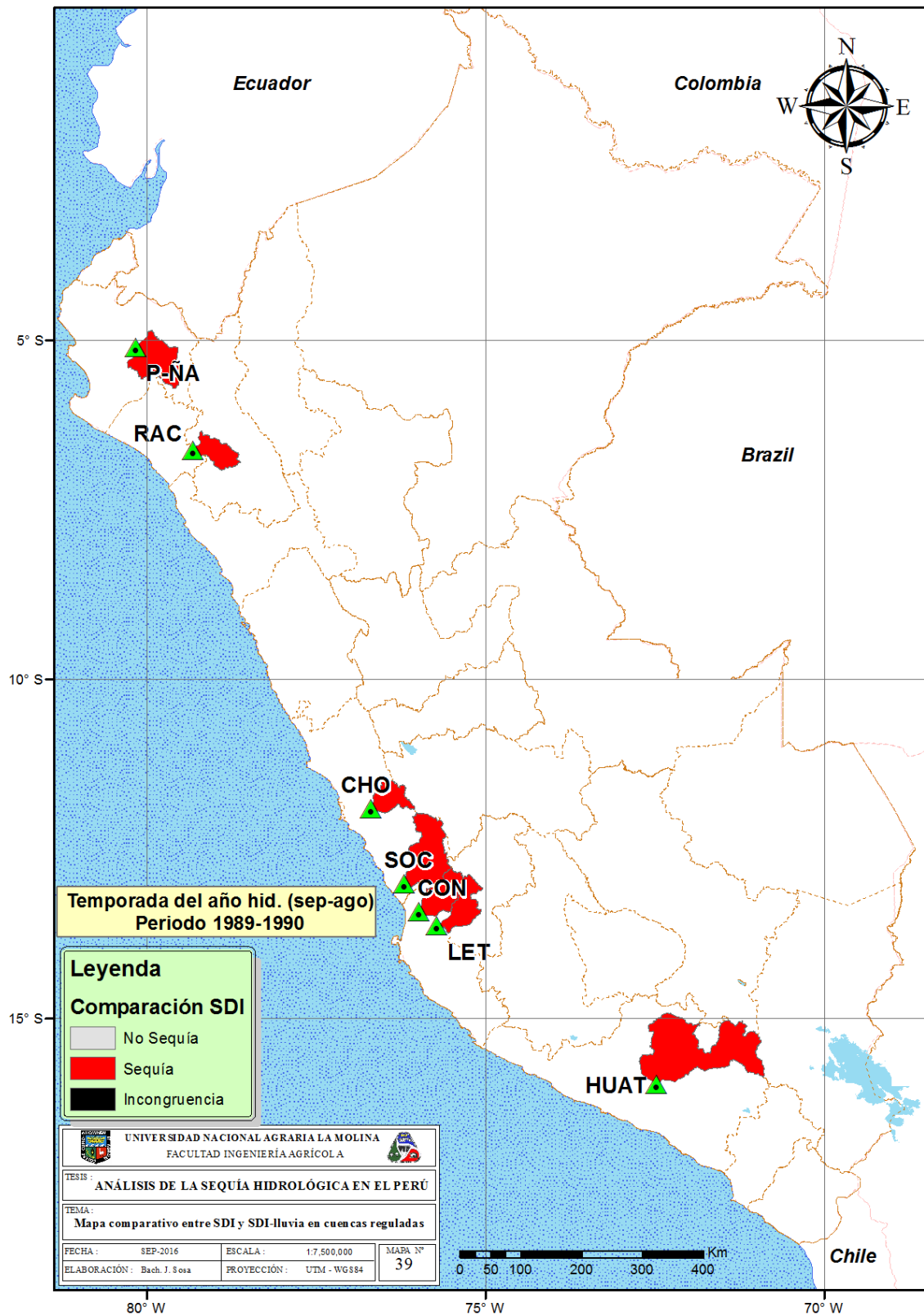
La **Figura 75** muestra condiciones de no sequía de lluvia e hidrológica en la mayoría de las estaciones hidrométricas a excepción de HUAT, este registro sequía de lluvia e hidrológica para la temporada del año hidrológico del periodo 1997-1998.





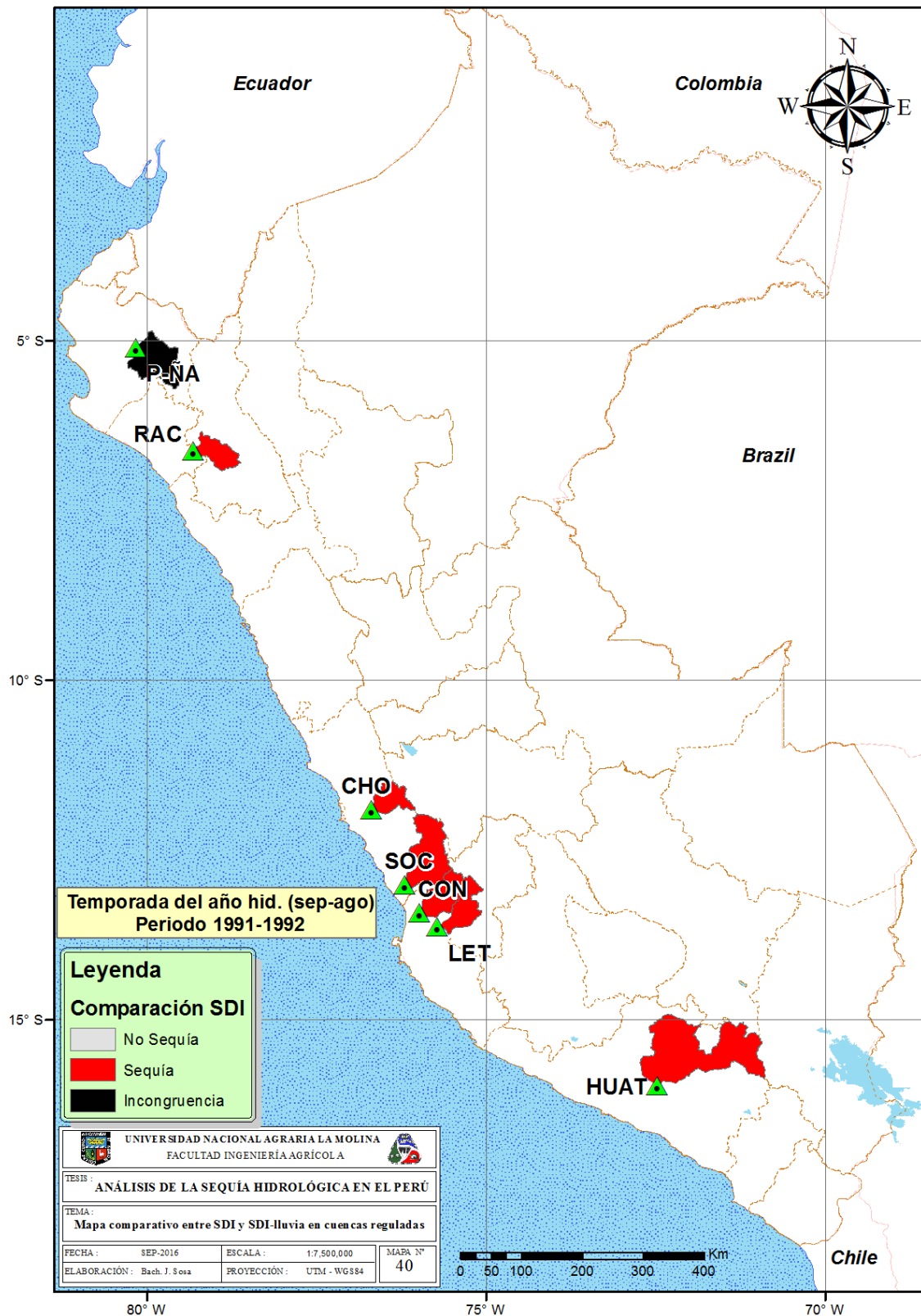
**Figura 72: Mapa comparativo entre SDI y SDI-lluvia en la temporada del año hidrológico del periodo 1982-1983.**

FUENTE: Elaboración propia (2016)



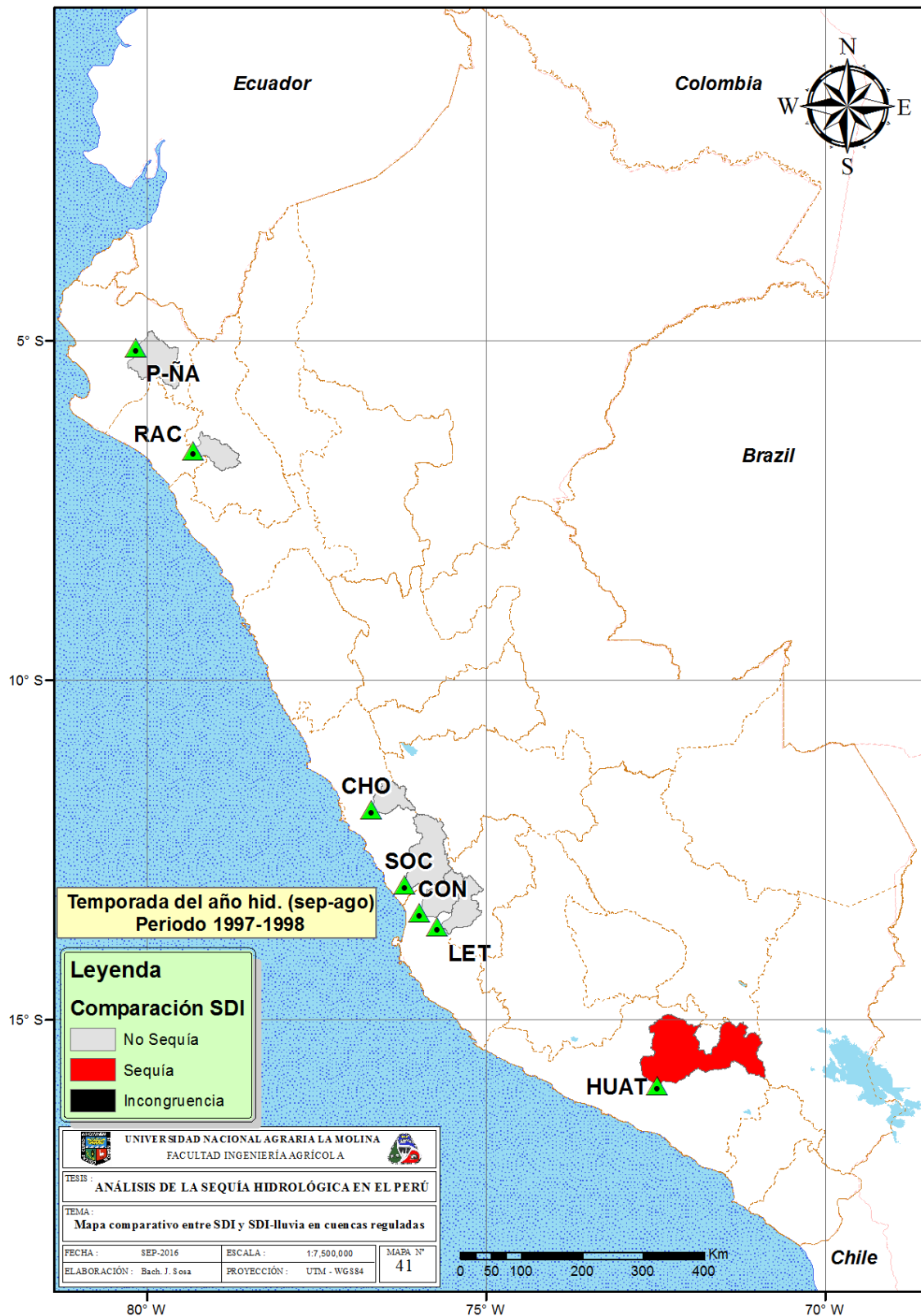
**Figura 73: Mapa comparativo entre SDI y SDI-lluvia en la temporada del año hidrológico del periodo 1989-1990.**

FUENTE: Elaboración propia (2016)



**Figura 74: Mapa comparativo entre SDI y SDI-lluvia en la temporada del año hidrológico del periodo 1991-1992.**

FUENTE: Elaboración propia (2016)



**Figura 75: Mapa comparativo entre SDI y SDI-lluvia en la temporada del año hidrológico del periodo 1997-1998.**

FUENTE: Elaboración propia (2016)

## VI. CONCLUSIONES

La caracterización de las sequías hidrológicas realizada en la presente investigación, mediante la aplicación del método de umbrales a un Índice de Sequía de Caudales (SDI), constituye un método alternativo para identificar el inicio, desarrollo y término de los eventos secos registrados en veintidós unidades hidrográficas de las tres Vertientes del Perú. A partir de esta aplicación se extraen las siguientes conclusiones:

A. Los datos hidrométricos recopilados de las veintidós estaciones hidrométricas fueron analizados mediante diferentes pruebas estadísticas, redujo las incertidumbres inherentes al proceso de recolección. Los supuestos básicos de toda variable hidroclimática (homogeneidad y estacionariedad), permitió elaborar una base de datos hidrométrica (caudal mensual) de calidad, con una cobertura espacial y temporal lo suficientemente amplia para caracterizar los eventos de sequías hidrológica, ocurridos en el periodo de evaluación (1973-2013) representativas en las tres vertientes del Perú.

Mediante el análisis de regionalización permitió obtener cinco zonas hidrológicamente homogéneas, tres en la vertiente del Pacífico denominadas (VA-ZN, VP-ZC y VP-ZS) uno en la vertiente del Titicaca denominada VT y VA-Z4 en la vertiente del Amazonas, estos determinados bajo el método del vector regional.

De acuerdo a las tendencias, en la vertiente del Pacífico no presento tendencia significativa, así mismo se obvio el análisis en siete estaciones hidrométricas (P-ÑA, RAC, CHO, SOC, CON, LET y HUAT), las cuales fueron consideradas como provenientes de cuencas antropizadas, en la vertiente del Amazonas las estaciones hidrométricas (CHA, S-RE, REQ y TAM) registraron tendencia descendente de la misma manera la estación hidrométrica ILA en la vertiente del Titicaca.

B. El cálculo del Índice de Sequía de Caudales (SDI) propuesto, permitió caracterizar espacial y temporalmente los eventos de sequía hidrológica ocurridos entre los años de 1973-2013 en las veintidós cuencas consideradas en este análisis de las tres vertientes del Perú, evaluando sus tres principales características (duración, intensidad y extensión espacial), estas características se evaluó aplicando el método de los estados de sequía hidrológica de la serie del caudal mensual acumulado en las tres temporadas de evaluación avenidas (diciembre–mayo), estiaje (junio–noviembre) y año hidrológico (agosto–septiembre), estos estados invariables en el tiempo y el espacio permitió definir los eventos de sequía leve, moderada, severa y extrema.

Las sequías hidrológicas de una determinada intensidad y duración, no necesariamente tendrá el mismo impacto (severidad) en otras cuencas dentro de las tres vertientes evaluadas, ya que la oferta hídrica anual varía considerablemente según la ubicación geográfica (latitud y longitud), de un análisis de los estados invariables en el tiempo y espacio, se identificó las temporadas de déficit hídrico según el  $SDI < 0$  que indican el inicio de los eventos de sequía hidrológica.

Los análisis han demostrado que el SDI también puede identificar las principales sequías registradas históricamente en ciertas regiones: en la zona centro de la vertiente del Pacífico entre los años 1989-1990 y 1991-1992, en la vertiente del Amazonas en la estación hidrométrica Borja en el periodo 1991-1992 y en la vertiente del Titicaca en la estación Ramis en el periodo 1989-1990.

De las veintidós cuencas consideradas en esta investigación y de diferentes regímenes hidrológicos en tres aspectos: régimen de precipitación, fondo geológico y grado de intervención antrópica, se realizó un análisis de lluvia en siete cuencas reguladas de la vertiente del Pacífico bajo el efecto de la antropización con la finalidad de relacionar la sequía hidrológica identificada por el SDI y la sequía de lluvia identificada por el SDI-lluvia. Los análisis han demostrado que en la mayoría de casos comparativos de los SDI y SDI-lluvia poseen una alta relación entre la sequía hidrológica y la sequía de lluvia en las temporadas de avenidas y del año hidrológico, sin embargo el efecto de mayor incongruencia fue en la temporada de estiaje en el periodo de 1982-1983.

Estas temporadas identificadas son elementos básicos para desarrollar una planificación operativa y apoyo a la toma de decisiones, requeridas a corto y mediano plazo para

implantar medidas mitigantes ante los impactos negativos de las sequías hidrológicas en la tres vertiente del Perú.

- C. El análisis de riesgo de sequía hidrológica en episodios ENOS con incidencia en eventos El Niño permitió determinar una alta probabilidad de ocurrencia de eventos de sequías hidrológicas en la mayoría de estaciones hidrométricas a excepción del E-TI (El Tigre), P-ÑA (Puente Ñacara), PUC (Puchaca), S-DO (Santo Domingo), CHO (Chosica) en la VP, y BOR (Borja), REQ (Requena), TAM (Tamishiyacu) en la VA en temporada del año hidrológico, caso similar resultó en la temporada de avenidas y estiaje, en este último con menor estaciones de incidencia.

En el caso del riesgo de sequía hidrológica en episodios ENOS con incidencia en eventos La Niña dio como resultado una baja probabilidad de ocurrencia en las temporadas de avenidas y año hidrológico. Sin embargo en la temporada de estiaje este mostro una mayor incidencia de eventos de sequía hidrológicas principalmente en las estaciones de la VT y la VA.

## **VII. RECOMENDACIONES**

Esta investigación es una herramienta muy útil para los tomadores de decisión y planificadores, que les permita administrar el normal abastecimiento del recurso hídrico para las diferentes actividades productivas, y desarrollar la capacidad institucional en temas de prevención mediante un sistema de alerta temprana ante eventos de sequía hidrológica.

Debido a la escasez de los registros hidrométricos y la dificultad que esto implica para el desarrollo de estudios detallados, se recomienda mantener la continuidad de los registros de caudales con el fin de contar con información en tiempo real, a fin de contribuir con mayor precisión al conocimiento del potencial hídrico en las cuencas de monitoreo y alertar tempranamente ante eventos de sequía hidrológica que se estén produciendo con el objetivo de minimizar los riesgos potenciales. En tal sentido se recomienda adicionalmente elaborar planes de mitigación ante posibles escenarios de sequía hidrológica a nivel de cuencas.

Para estudios futuros en temas de sequías, se recomienda hacer cruces de información de otros índices de sequía (SPI, PHDI, RDI, etc.), así mismo realizar un análisis con otras variables hidroclimáticas y un análisis de tendencia del balance hídrico las infraestructuras hidráulicas de regulación (embalses) a fin de tener una idea clara de los impactos que ha ocasionado los eventos de sequía hidrológica que se han producido históricamente en las tres vertientes del país asociado a episodios ENOS (El Niño y La Niña).

Instar a las instituciones y/o Ministerios encargados en temas ambientales a introducir nuevas metodologías con uso de imágenes satelitales de alta resolución para clasificar con mayor precisión las zonas de vulnerabilidad ante eventos de sequía hidrológica en los diferentes sectores (social, productivo, etc.), a fin de contar en un futuro cercano con diversas herramientas acorde a nuestra realidad, para minimizar los riesgos que la sequía hidrológica produce en la sociedad, generando como producto final un mapas nacional de zonificación de riesgo de sequías hidrológicas, el índice (SDI) y las características de las sequías hidrológicas que de él se derivan permitirán zonificar el riesgo y/o vulnerabilidad de las sequías hidrológicas en las tres vertientes del Perú.



## VIII. BIBLIOGRAFIA

- ANA (Autoridad Nacional del Agua, PE) y MINAGRI (Ministerio de Agricultura, PE). 2010. Recursos Hídricos en el Perú. Lima, PE. 372 p.
- Beguería, S. 2002. Revisión de métodos paramétricos para la estimación de la probabilidad de ocurrencia de eventos extremos en climatología e hidrología: El uso de series de excedencias y su comparación con las series de máximos anuales. Información climática como herramienta de gestión ambiental. VII Reunión Nacional de Climatología 83-92p.
- Ben-Zvi, A., 1987. Indices of hydrological drought in Israel. *J. Hydrol.*; 92(1-2): 179-191 p.
- Beran, M.A., Rodier, J.A., 1985. Hydrological aspects of drought. In: UNESCO-WMO Studies and Reports in Hydrology 39:149 p.
- Cancelliere, A., Di Mauro, G., Bonaccorso, B., Rossi, G., 2007. Drought forecasting using the Standardized Precipitation Index. *Water Resour. Manage.*; 21: 801–819 p.
- Efstratiadis, A., Nalbantis, I., Mamassis, N. 2000. Hydrometeorological data processing. In: Modernisation of the supervision and management of the water resource system of Athens, Report 8:129 pages. Department of Water Resources, Hydraulic and Maritime Engineering - National Technical University of Athens, Athens.
- Espinoza, J.C., Guyot, J.L., Ronchail, J., Cochonneau, G., Filizola, N., Fraizy, P., Labat, D., Noriega, L., Oliveira, E., Ordoñez, J.J. & Vauchel, P. (2009). Contrasting regional discharge evolutions in the amazon basin (1974 – 2004). Accepted by *Journal of Hydrology*.
- Fattorelli, S; Fernandez, P. 2011. Diseño Hidrológico. FR, Paris. Edición digital.
- Fernández, B. 1997. Identificación y caracterización de sequías hidrológicas en Chile. Artículo publicado en *Ingeniería del Agua*. 4(4): 37-46 p.
- Fleig, A.K; Tallaksen, L.M; Hisdal, H; Demuth, S. 2006: A global evaluation of streamflow drought characteristics. *Hydrology and Earth System Sciences* 10: 535-552 p

- García, A. 2008. Metodología para la generación y evaluación de políticas de operación en sistemas de recursos hídricos, Aplicación a un sistema de México. Tesis Ph.D. Valencia, España, UPV.
- Gonzalez, J. 2005. Caracterización Estocástica de la realización Espacio-Temporal de Eventos hidrológicos Extremos de sequías, Tesis Ph.D. Valencia, España, UPV.
- Grubbs, F. E. 1969. Procedures for Detecting Outlying Observations in Samples. *Technometrics* vol 11(1): 1-21p.
- IPCC (The Intergovernmental Panel on Climate Change) 2009. Glosario corto de términos y conceptos importantes relacionados con el cambio climático.
- Kendall, M. G., 1975. *Rank Correlation Methods*, 4th ed., Charles Griffin: London.U.K 210 p.
- Lavado, W.S.C., Ronchail, J., Labat, D., Espinoza, J.C., Ordoñez, J.J. & Guyot, J.L. A basin-scale trends in rainfall and runoff in Peru (1969-2004): Pacific, Titicaca and Amazonas drainages.2-14 p.
- Lorenzo, J. 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. Tesis Ph.D. Zaragoza, España.
- Nalbantis, I., Mamassis, N., Koutsoyiannis, D., 1994. Le phénomène récent de sécheresse persistante et l'alimentation en eau de la cité d'Athènes. *Comptes-rendus du 6ème colloque de l'Association Internationale de Climatologie*, Thessalonique, 20-25 Septembre 1993, 8 p.
- Nalbantis, I; Tsakiris, G. 2009. Assessment of hydrological drought revisited. *Water Resources Management*. 881-897 p.
- Nalbantis, I, Tsakiris, G., 2008. Assessment of Hydrological Drought Revisited. *Water Resour. Manage.*; DOI 10.1007/s11269-008- 9305-1
- Núñez, D; Muñoz, C; Reyes, V; Velasco, I; Gadsden, H. 2007. Caracterización de la sequía a diversas escalas de tiempo en chihuahua, México. *Agrociencia*. Vol. 41: 253-262 p.
- OMM (Organización Meteorológica Mundial). 2006. Vigilancia y alerta temprana de la sequía. N° 1006.
- OMM (Organización Meteorológica Mundial). 1966. *Vocabulario Meteorológico Internacional*. Nota Técnica N° 182. Ginebra, Suiza. 91p.

- Tsakiris, G., Vangelis, H., 2004. Towards a Drought Watch System based on Spatial SPI. *Water Resour. Manage.*; 18: 1–12. Tsakiris, G., Vangelis, H., 2005. Establishing a Drought Index Incorporating Evapotran-spiration. *European Water*; 3-11 p.
- Tsakiris, G., Pangalou, D., Vangelis, H., 2007. Regional Drought Assessment based on the Reconnaissance Drought Index (RDI). *Water Resour. Manage.*; 821-833 p.
- Valiente, M. 2001. Sequía: Definiciones, topologías y Métodos de Cuantificación. *Investigaciones Geográficas*. 26: 59-80 p.
- Van Loon, A.F; Van Lanen, H.A; Hisdal, H; Tallaksen, L.M; Fendeková, M; Oosterwijk, J; Horvát, O; Machlica, A. 2010: Understanding hydrological winter drought in Europe. IAHS Publ. 340, Wallingford, UK.
- Vauchel, P. 2004. Derniers développements du logiciel Hydraccess, Institut de recherche pour le développement 1: 247-251 p.
- Vicente, S.M; López, M.J; Begueria, S; Lorenzo, J; Azorin, C; Morán, E. 2012. Accurate computation of a streamflow drought index. *Journal of Hydrologic Engineering* 318-332 p.
- Villalobos, A. 2007. Análisis y seguimiento de distintos tipos de sequía en la cuenca del río Júcar. Tesis Ph.D. Valencia, España, UPV.
- Vogel, R. M; Thomas, W. O; McMahon, T. A. 1993. Flood frequency model selection in southwestern United States. *Journal Water Resour. Plann. Manage.*, 119(3): 353–366 p.
- Wilhite, D.A; Glantz, M.H. 1985. Understanding the Drought Phenomenon: The Role of Definitions. *Water International* 10(3):111-120 p.
- Xu, Z.X., Takeuchi, K. & Ishidaira, H. (2004). Correlation between El Nino-Southern Oscillation (ENSO) and precipitation in South-east Asia and the Pacific region. *Hydrological Processes*, 18(1):107-123 p.
- Yue, S; Pilon, P; Phinney, B; Cavadias, G. 2002. The influence of autocorrelation on the ability to detect trend in hydrological series. *Hydrological Processes* 16(9): 1807-1829 p.
- Yevjevich V. 1967. An objective approach to definitions and investigations of continental hydrologic droughts. Colorado State University, Hydrology Paper No. 23.

## IX. ANEXOS

### ANEXO 1: PRUEBAS ESTADÍSTICAS IMPLEMENTADAS.

#### a) Test de Mann-Kendall.

La prueba de Mann-Kendall (MK), también llamada prueba de tau Kendall por (Mann, 1945) y (Kendall, 1975), es una prueba no paramétrica basada en el rango para evaluar la importancia de una tendencia, y ha sido ampliamente utilizado en detección de tendencia en estudios hidrológicos.

La hipótesis nula  $H_0$ : No existe una tendencia en la serie  $(X_i, i= 1, 2, \dots, n)$ .

La hipótesis alternativa  $H_1$ : Hay una tendencia en la serie.

El estadístico S de Tau de Kendall se define como sigue (Yue et al., 2002).

$$S = \sum_{i=1}^{n-1} \sum_{j=i+1}^n \text{sgn}(X_j - X_i) \quad (\text{A-1})$$

Donde el  $X_j$  son valores de datos secuenciales, n es la longitud del conjunto de datos, y:

$$\text{sgn}\theta = \begin{cases} 1 & \text{si } \theta > 0 \\ 0 & \text{si } \theta = 0 \\ -1 & \text{si } \theta < 0 \end{cases}$$

Mann (1945) y Kendall (1975) han documentado que cuando  $n = 8$ , la estadística S es aproximadamente normalmente distribuido con la media y la varianza de la siguiente manera:

$$E(S) = 0 \quad (\text{A-2})$$

$$V(S) = \frac{n(n-1)(2n+5) - \sum_{m=1}^n t_n m(m-1)(2m+5)}{18} \quad (\text{A-3})$$

Donde  $t_m$  es el número de vínculos de grado  $m$ . La prueba estadística estandarizada  $Z$  se calcula:

$$Z = \begin{cases} = \frac{S-1}{\sqrt{V(S)}}, & \text{si } S > 0 \\ = 0, & \text{si } S = 0 \\ = \frac{S-1}{\sqrt{V(S)}}, & \text{si } S < 0 \end{cases} \quad (\text{A-4})$$

El valor de probabilidad  $P$  de la estadística  $S$  de MK para datos de la muestra se puede estimar usando la función de distribución acumulativa normal como:

$$P = \frac{1}{\sqrt{2\pi}} \int_{-\alpha}^Z e^{-t^2/2} dt \quad (\text{A-5})$$

Si los datos de la muestra están correlacionados serialmente, será necesario blanquear previamente los datos y aplicar una corrección para calcular la varianza.

#### **b) Prueba de Grubbs.**

Es una técnica estadística para el tratamiento de datos cuantitativos sensible a la presencia de valores atípicos en un conjunto de datos de valor  $N$  (Grubbs, F. 1969).

La prueba se basa en el criterio de “distancia del valor sospechado respecto a la media del conjunto de datos en comparación con la desviación estándar”.

Si sospecha que el valor máximo en el conjunto de datos puede ser un valor atípico puede utilizar la estadística de prueba

$$G = \frac{x_{max} - \bar{x}}{s} \quad (\text{A-6})$$

Si sospecha que el valor mínimo en el conjunto de datos puede ser un valor atípico puede utilizar la estadística de prueba

$$G = \frac{\bar{x} - x_{min}}{s} \quad (\text{A-7})$$

El valor crítico para la prueba es

$$G_{crit} = \frac{(n-1)t_{crit}}{\sqrt{n(n-2+t_{crit}^2)}} \quad (\text{A-8})$$

Dónde  $t_{crítico}$  es el valor crítico de la distribución  $t T(n-2)$  y el nivel de significación es  $\alpha/n$ . Así, la hipótesis nula se rechaza si  $G > G_{crit}$ .

También hay una versión de dos colas de la prueba en la que  $G$  es el mayor de los dos  $G$  valores descritos anteriormente y  $G_{crit}$  se define como anteriormente, excepto que el nivel de significación para  $t_{crit}$  es  $\alpha/(2n)$ . Alternativamente,  $G$  se puede calcular utilizando la fórmula

$$G = \frac{\max|x_i - \bar{x}|}{s} \quad (\text{A-9})$$

En La **Tabla A-1** se muestra los valores críticos para diferentes niveles de confianza (95% y 99%) y diferentes valores de N.

**Tabla A-1: Valores Críticos del Test de Grubbs.**

N	$G_{critical}$ (95%)**	$G_{critical}$ (99%)**	N	$G_{critical}$ (95%)**	$G_{critical}$ (99%)**
3	1.15	1.15	19	2.53	2.85
4	1.46	1.49	20	2.56	2.88
5	1.67	1.75	21	2.58	2.91
6	1.82	1.94	22	2.6	2.94
7	1.94	2.1	23	2.62	2.96
8	2.03	2.22	24	2.64	2.99
9	2.11	2.32	25	2.66	3.01
10	2.18	2.41	30	2.75	
11	2.23	2.48	35	2.82	
12	2.29	2.55	40	2.87	
13	2.33	2.61	45	2.92	
14	2.37	2.66	50	2.96	
15	2.41	2.71	60	3.03	
16	2.44	2.75	70	3.09	
17	2.47	2.79	80	3.14	
18	2.5	2.82	90	3.18	
19	2.53	2.85	100	3.21	

El porcentaje expresa el nivel de confianza

FUENTE: Grubbs(1969)

**c) Prueba de T-Student.**

Uno de los análisis estadísticos más comunes en la práctica es probablemente el utilizado para comparar dos grupos independientes de observaciones con respecto a una variable numérica.

La aplicación de un contraste paramétrico requiere la normalidad de las observaciones para cada uno de los grupos. La comprobación de esta hipótesis puede realizarse tanto por métodos gráficos (por medio de histogramas, diagramas de cajas o gráficos de normalidad) como mediante tests estadísticos. Un número suficiente de observaciones (mayor de 30) justifica la utilización del mismo test.

Así mismo, este tipo de metodología exigirá que la varianza en ambos grupos de observaciones sea la misma. En primer lugar se desarrollará el test t de Student para el caso en el que se verifiquen ambas condiciones, discutiendo posteriormente el modo de abordar formalmente el caso en el que las varianzas no sean similares.

Bajo las hipótesis de normalidad e igual varianza la comparación de ambos grupos puede realizarse en términos de un único parámetro como el valor medio.

El T test para dos muestras independientes se basa en el estadístico:

$$t = \frac{\bar{X} - \bar{Y}}{\sqrt{\frac{(n-1)\hat{S}_1^2 + (m-1)\hat{S}_2^2}{n+m-2} \left( \frac{1}{n} + \frac{1}{m} \right)}} \quad (\text{A-10})$$

Dónde  $\bar{X}$  e  $\bar{Y}$  denotan el valor medio en cada uno de los grupos.

Si la hipótesis de partida es cierta el estadístico (A-10) seguirá una distribución t de Student con (n+m-2 grados de libertad). De ser así, el valor obtenido debería estar dentro del rango de mayor probabilidad según esta distribución.

Usualmente se toma como referencia el rango de datos en el que se concentra el 95% de la probabilidad. El valor-p que usualmente reportan la mayoría de paquetes estadísticos no es más que la probabilidad de obtener, según esa distribución, un dato más extremo que el que proporciona el test. Como ya se dijo, refleja también la probabilidad de obtener los datos observados si fuese cierta la hipótesis inicial. Si el valor-p es muy pequeño (usualmente se

considera  $p < 0.05$ ) es poco probable que se cumpla la hipótesis de partida y se debería de rechazar. La región de aceptación corresponde por lo tanto a los valores centrales de la distribución para los que  $p > 0.05$ .

### **Dos muestras independientes con varianza distinta.**

El caso en el que se dispone de dos grupos de observaciones independientes con diferentes varianzas, la distribución de los datos en cada grupo no puede compararse únicamente en términos de su valor medio. Obviamente, el primer problema a resolver es el de encontrar un método estadístico que nos permita decidir si la varianza en ambos grupos es o no la misma. El test de la razón de varianzas viene a resolver este problema. Bajo la suposición de que las dos poblaciones siguen una distribución normal y tienen igual varianza se espera que la razón de varianzas:

$$F = \frac{\frac{1}{n-1} \sum_{i=1}^n (X_i - \bar{X})^2}{\frac{1}{m-1} \sum_{i=1}^m (Y_i - \bar{Y})^2} = \frac{\hat{S}_1^2}{\hat{S}_2^2} \quad (\text{A-11})$$

Siga una distribución F de Snedecor con parámetros  $(n-1)$  y  $(m-1)$ .

En este tipo de situaciones, donde no se debe aplicar el contraste basado en (A-10), podemos utilizar una modificación del test para el caso de varianzas desiguales, conocido como el test de Welch basada en el estadístico:

$$t = \frac{(\bar{X} - \bar{Y})}{\sqrt{\frac{\hat{S}_1^2}{n} + \frac{\hat{S}_2^2}{m}}} \quad (\text{A-12})$$

Que, bajo la hipótesis nula seguirá una distribución t de Student con un número  $f$  de grados de libertad que dependerá de las varianzas muestrales según la expresión:

$$f = \frac{\left( \frac{\hat{S}_1^2}{n} + \frac{\hat{S}_2^2}{m} \right)}{\frac{1}{n+1} \left( \frac{\hat{S}_1^2}{n} \right)^2 + \frac{1}{m+1} \left( \frac{\hat{S}_2^2}{m} \right)^2} - 2 \quad (\text{A-13})$$



La técnica para realizar el contraste es análoga a la vista anteriormente cuando las varianzas son desconocidas e iguales.

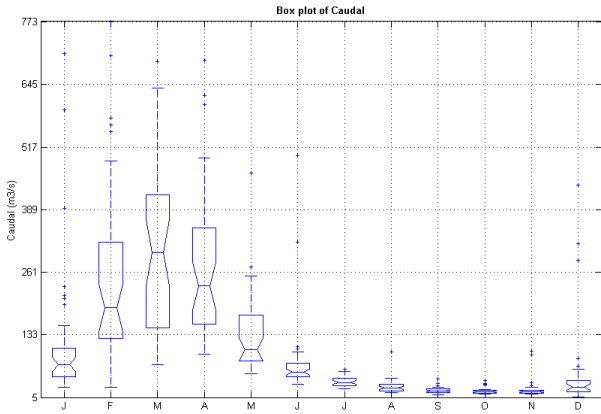
Al igual que en el caso anterior, podrá optarse por calcular el correspondiente 95% intervalo de confianza para la diferencia de medias dado por:

$$(\bar{X} - \bar{Y}) \pm t_{0.975}^f \sqrt{\frac{\hat{S}_1^2}{n} + \frac{\hat{S}_2^2}{m}} \quad (\text{A-14})$$

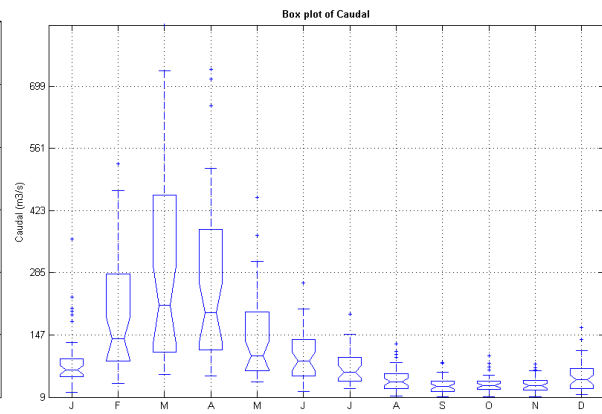
## ANEXO 2: ANÁLISIS EXPLORATORIO DE DATOS MENSUALES.

### a) Gráficos de Boxplot.

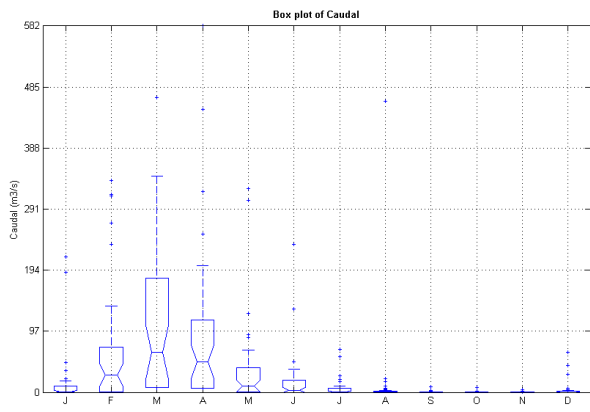
#### E-TI



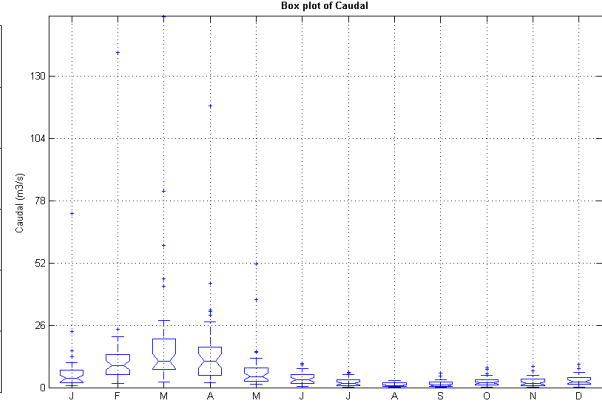
#### E-CI



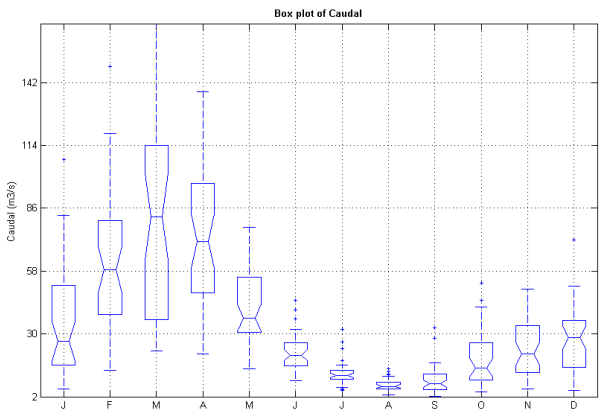
#### P-ÑA



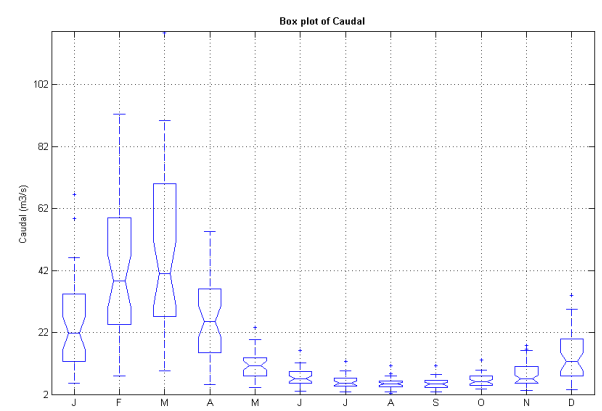
#### PUC

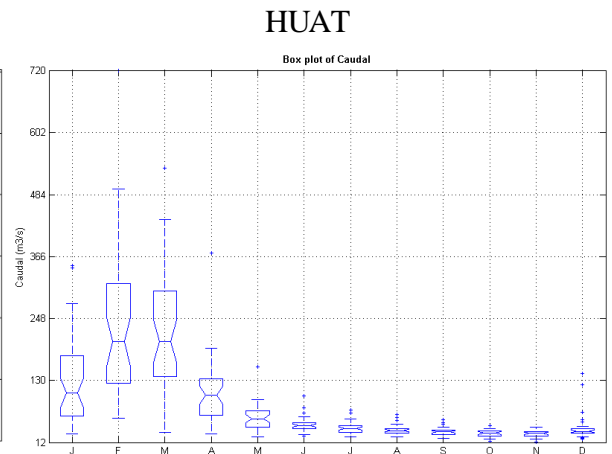
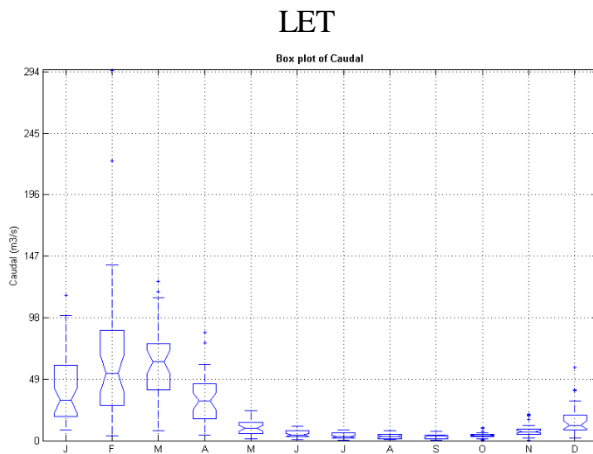
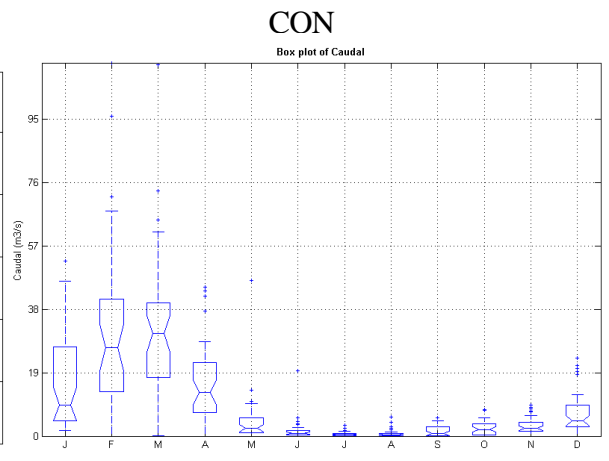
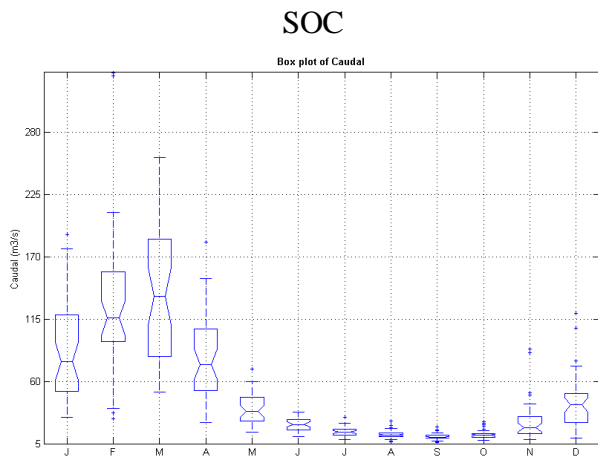
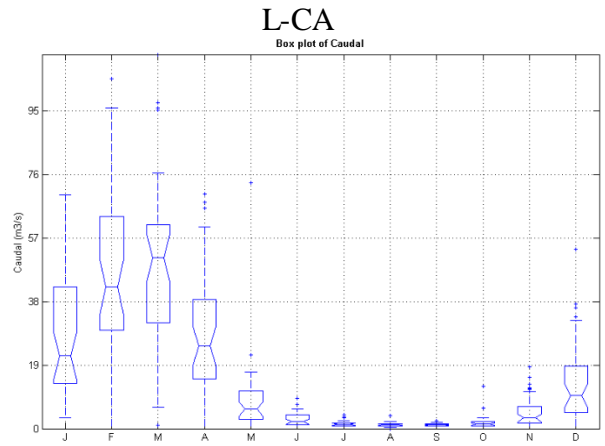
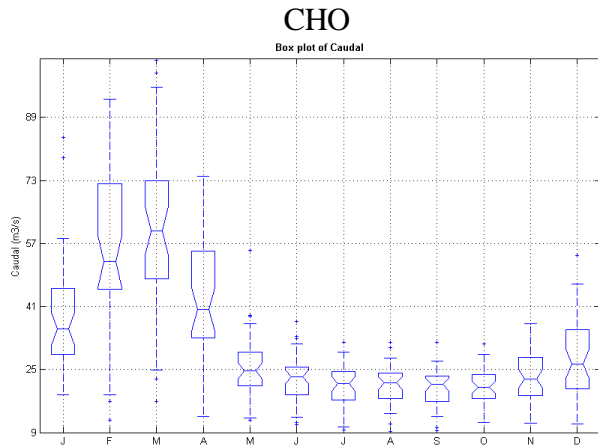


#### RAC

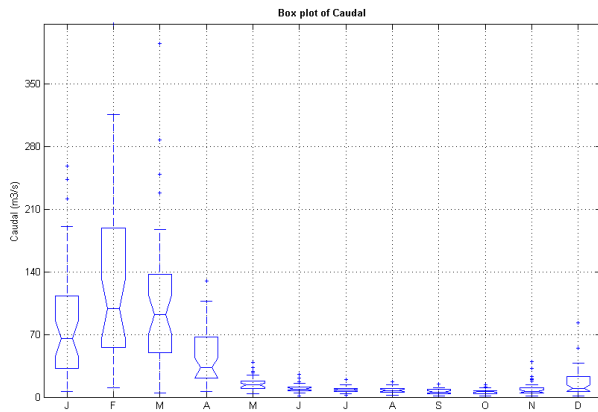


#### S-DO

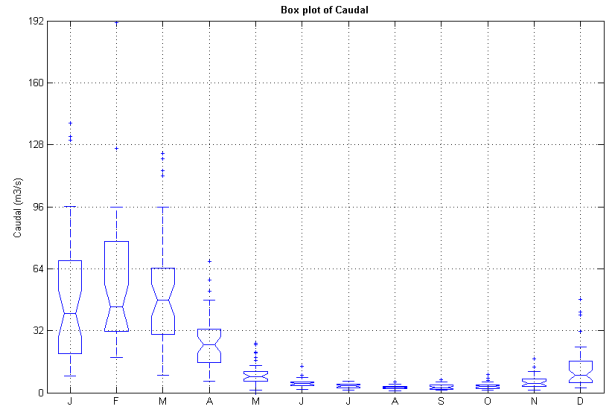




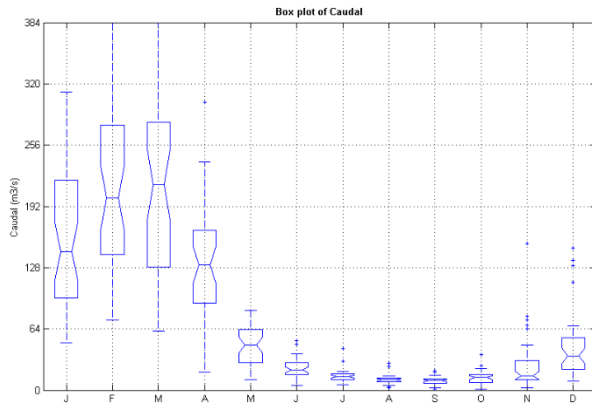
### ILA



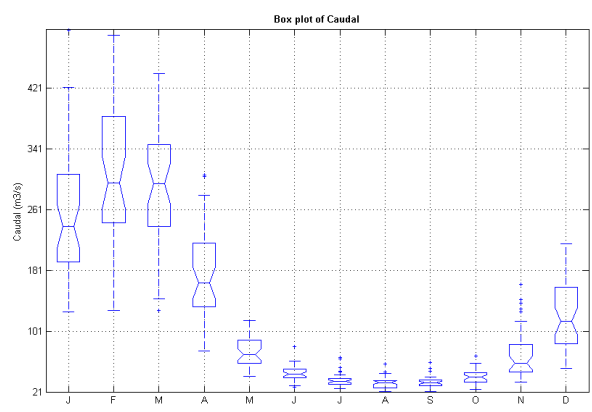
### HUAN



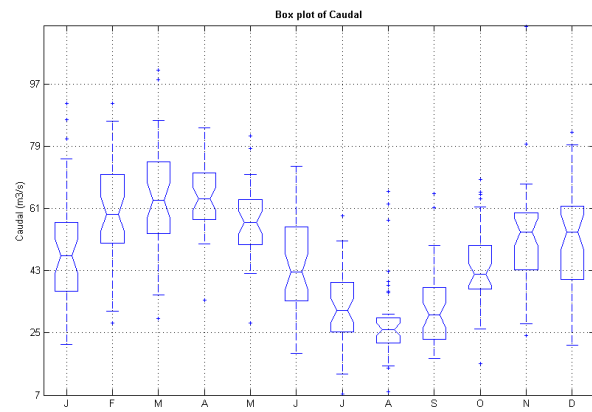
### RAM



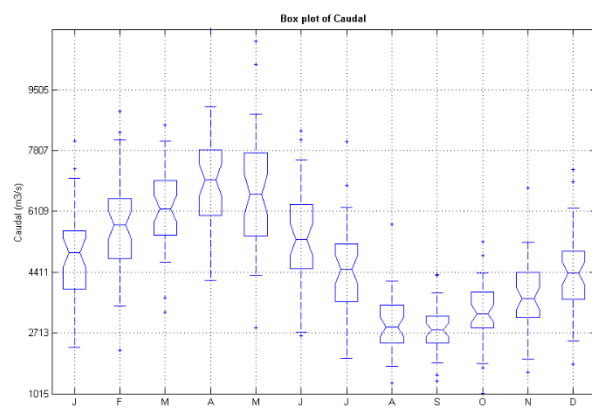
### K105



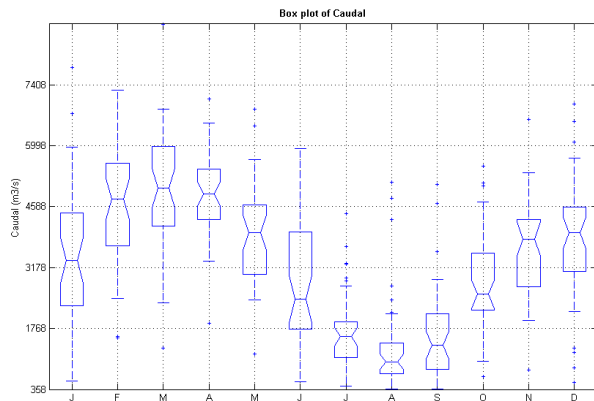
### SHA



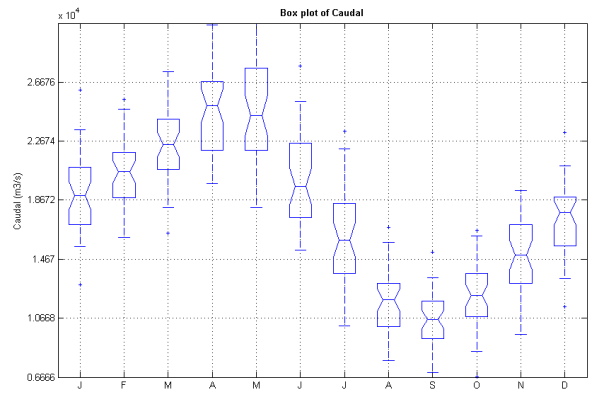
### BOR



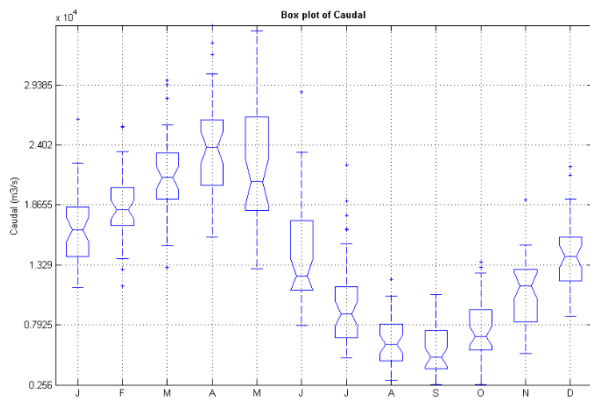
### CHA



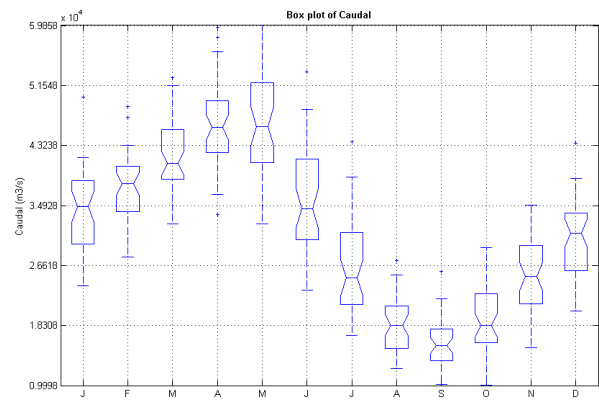
### S-RE



### REQ



### TAM

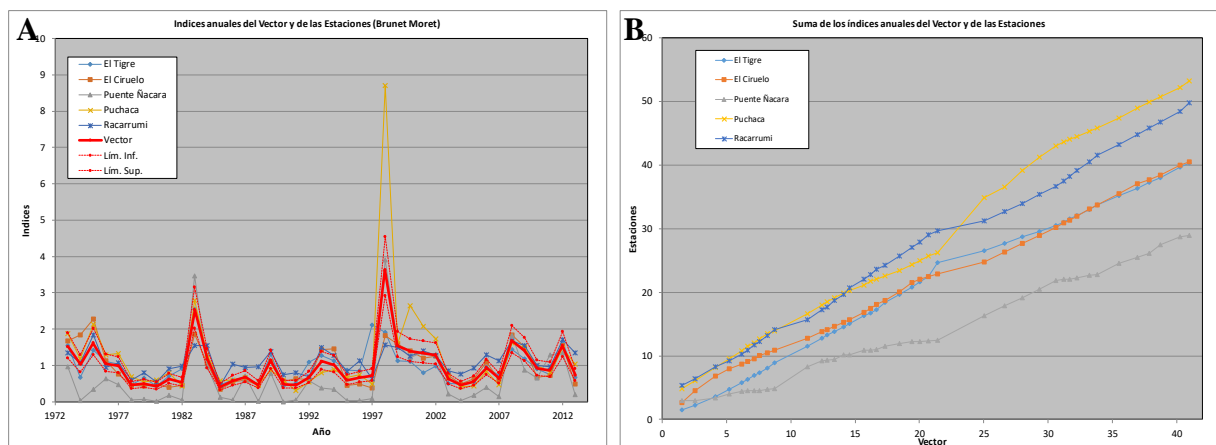


### ANEXO 3: REGIONES ESTADÍSTICAMENTE HOMOGÉNEAS.

a) Método del vector regional para las estaciones de la región VP-ZN.

**Tabla A-2: Indicadores estadísticos de la región VP-ZN.**

Estación	No Años	Coef. Variación	D.E. Desvíos	Correl. /Vector
El Tigre	41	0.49	0.398	0.765
El Ciruelo	41	0.562	0.374	0.8
Puente Ñacara	41	1.314	0.506	0.921
Puchaca	41	1.099	0.847	0.904
Racarrumi	41	0.312	0.45	0.73

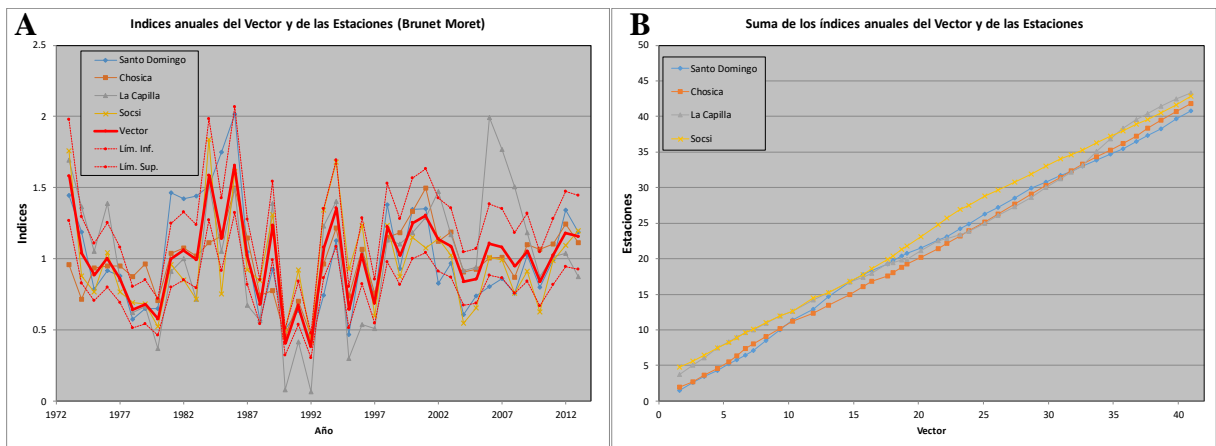


**Figura A-1:** Gráfico de índices (A) y gráfico de índices acumulados (B) de las estaciones y el Vector VP-ZN.

b) Método del vector regional para las estaciones de la región VP-ZC.

**Tabla A-3: Indicadores estadísticos de la región VP-ZC.**

Estación	No Años	Coef. Variación	D.E. Desvíos	Correl. /Vector
Santo Domingo	41	0.372	0.214	0.812
Chosica	41	0.229	0.183	0.766
La Capilla	41	0.445	0.278	0.794
Socsi	41	0.347	0.17	0.865

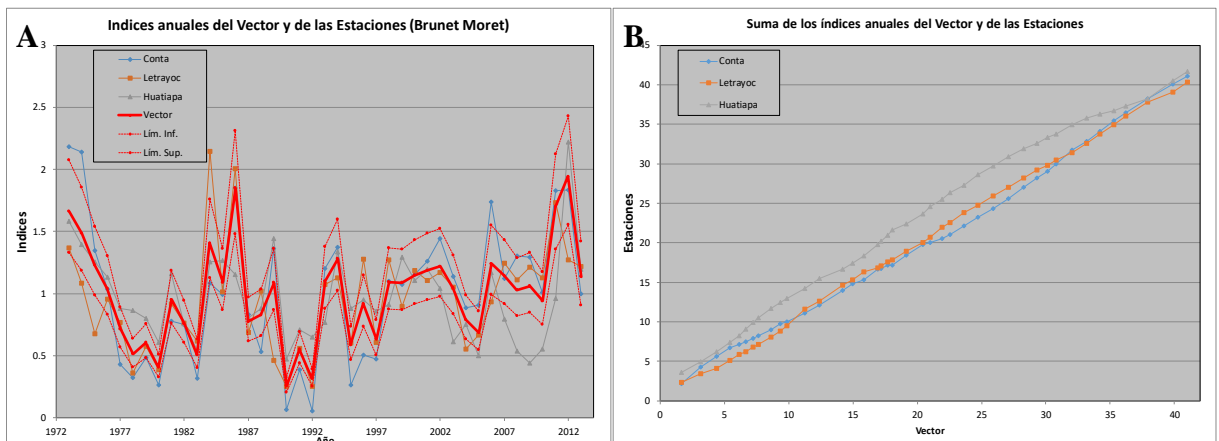


**Figura A-2:** Gráfico de índices (A) y grafico de índices acumulados (B) de las estaciones y el Vector VP-ZC.

c) Método del vector regional para las estaciones de la región VP-ZS.

**Tabla A-4: Indicadores estadísticos de la región VP-ZS.**

Estación	No Años	Coef. Variación	D.E. Desvíos	Correl. /Vector
Conta	41	0.545	0.233	0.925
Letrayoc	41	0.44	0.248	0.817
Huatiapa	41	0.369	0.282	0.719

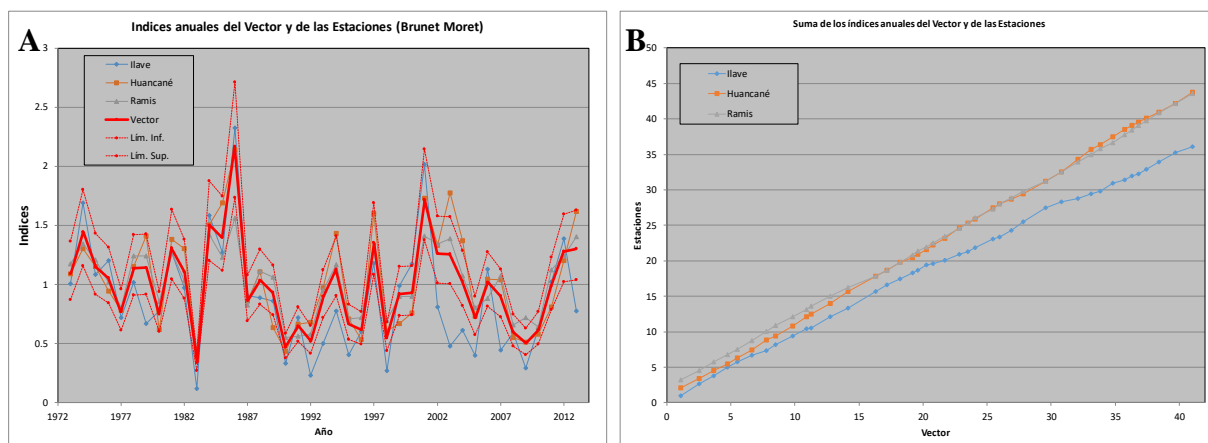


**Figura A-3:** Gráfico de índices (A) y grafico de índices acumulados (B) de las estaciones y el Vector VP-ZS.

d) Método del vector regional para las estaciones de la región VT.

**Tabla A-5: Indicadores estadísticos de la región VT.**

Estación	No Años	Coef. Variación	D.E. Desvíos	Correl. /Vector
Ilave	41	0.538	0.263	0.87
Huancané	41	0.415	0.171	0.925
Ramis	41	0.286	0.141	0.935



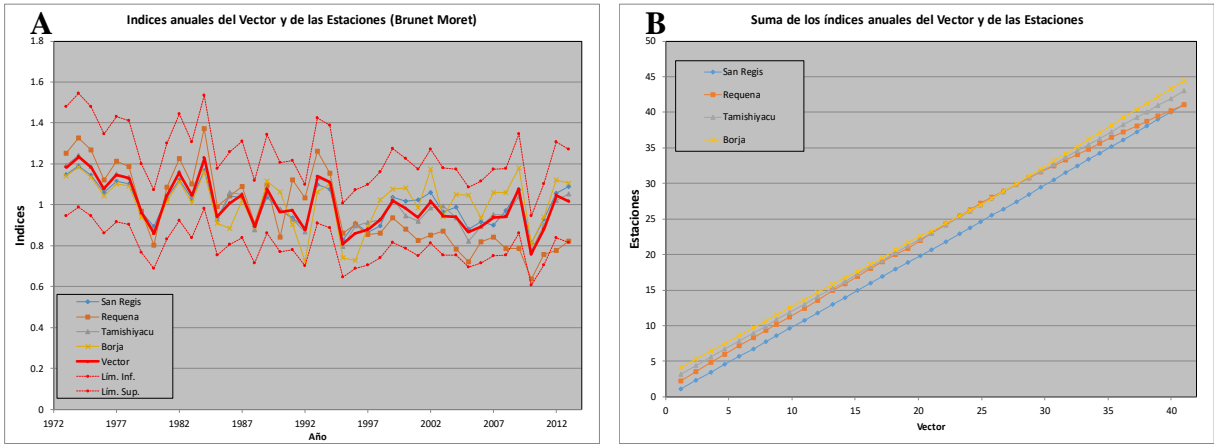
**Figura A-4:** Gráfico de índices (A) y gráfico de índices acumulados (B) de las estaciones y el Vector VT.

e) Método del vector regional para las estaciones de la región VA-ZA.

**Tabla A-6: Indicadores estadísticos de la región VA-ZA.**

Estación	No Años	Coef. Variación	D.E. Desvíos	Correl. /Vector
San Regis	41	0.097	0.035	0.96
Requena	41	0.193	0.114	0.829
Tamishiyacu	41	0.116	0.023	0.98
Borja	41	0.123	0.08	0.782

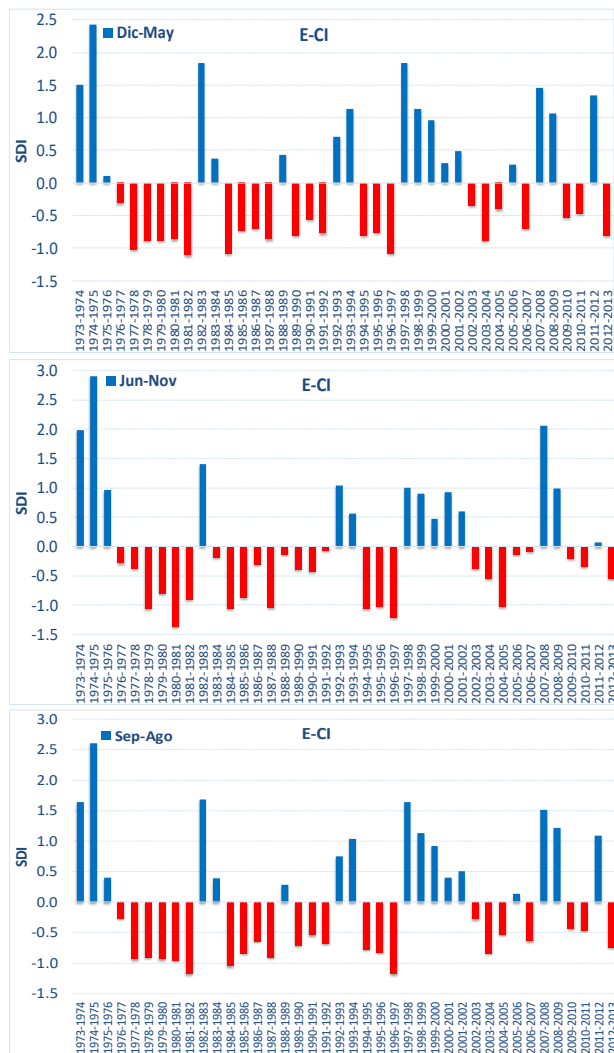
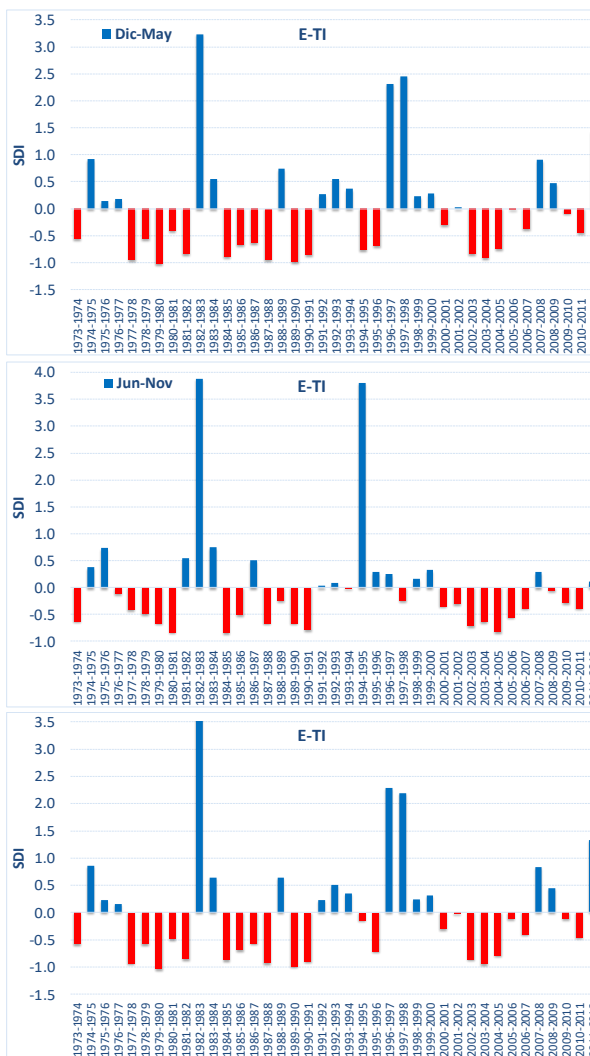


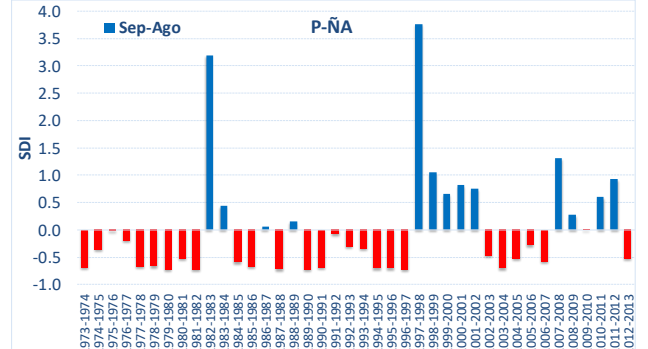
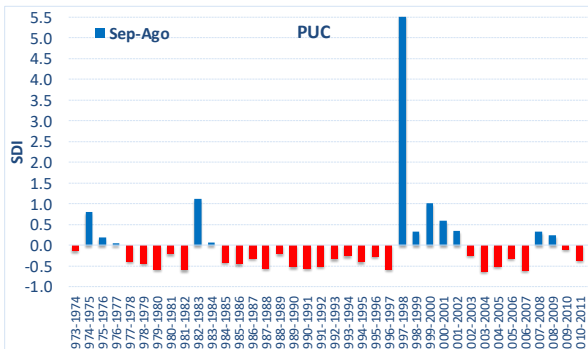
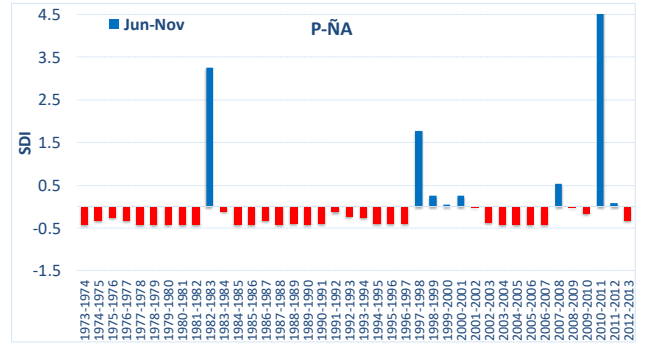
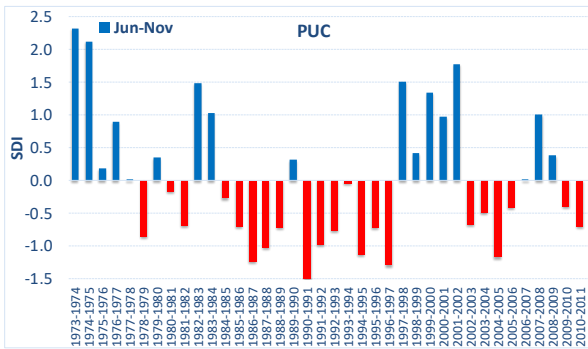
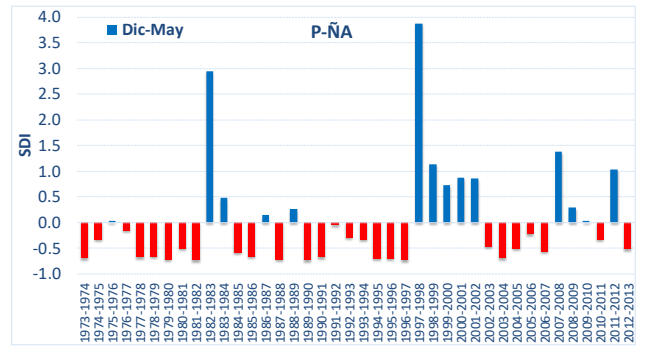
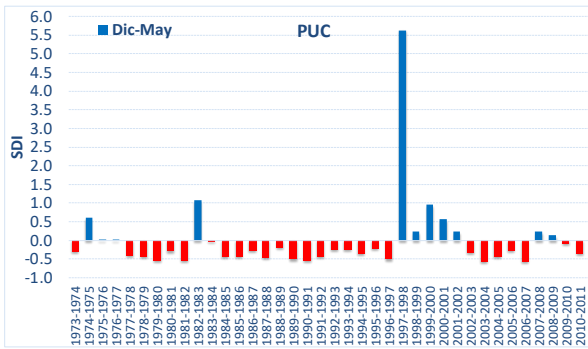


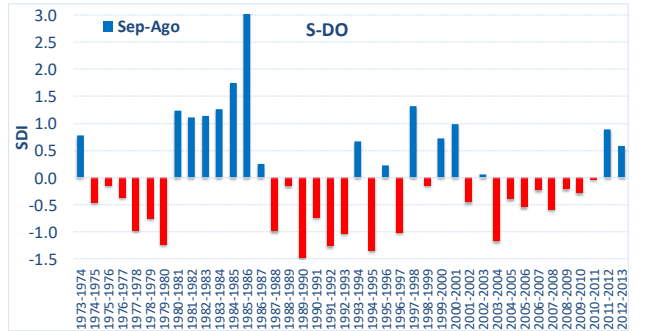
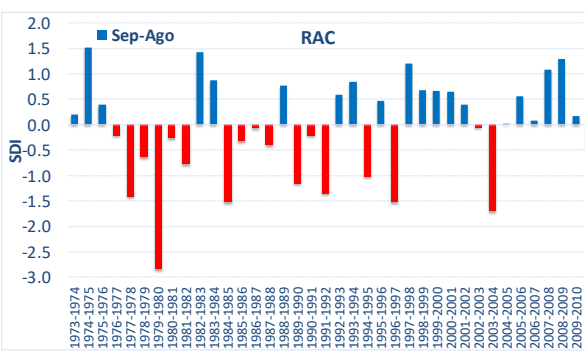
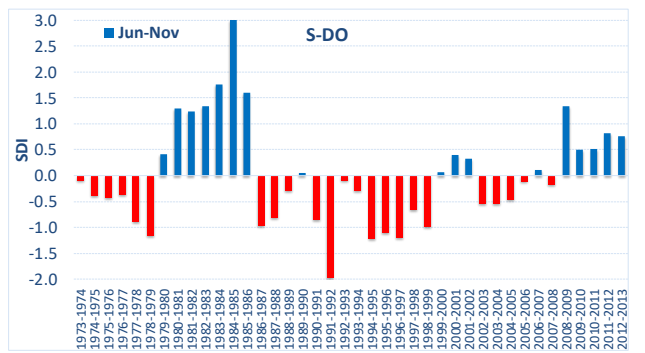
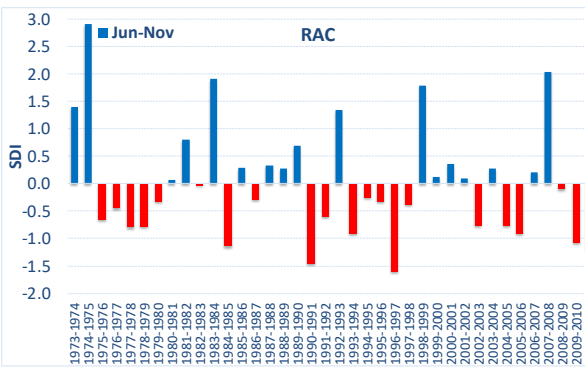
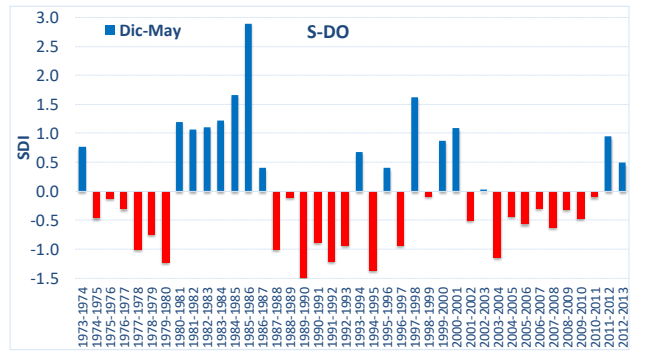
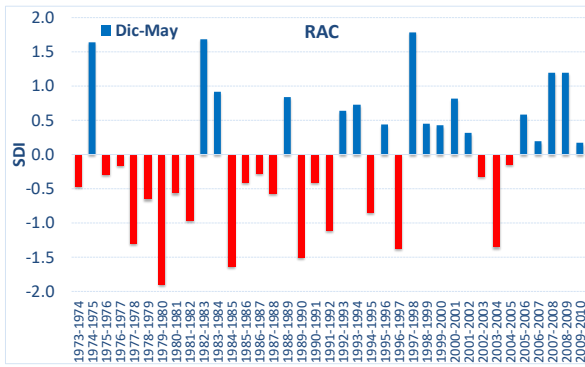
**Figura A-5:** Gráfico de índices (A) y gráfico de índices acumulados (B) de las estaciones y el Vector VA-Z4.

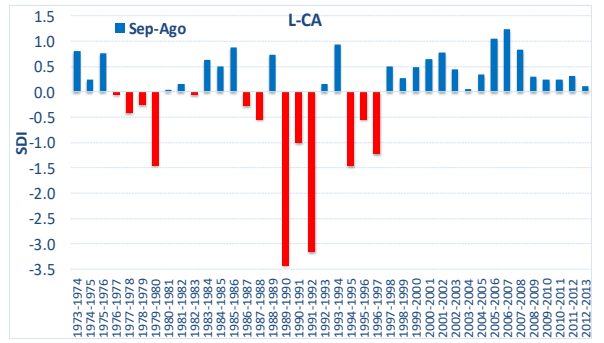
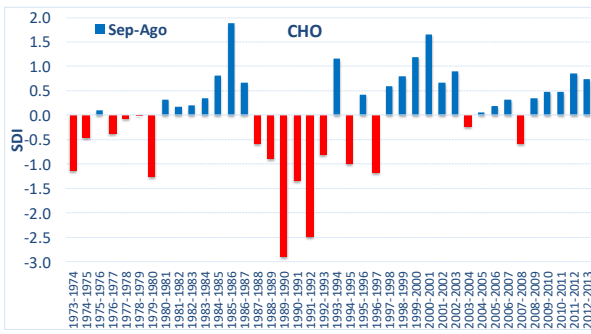
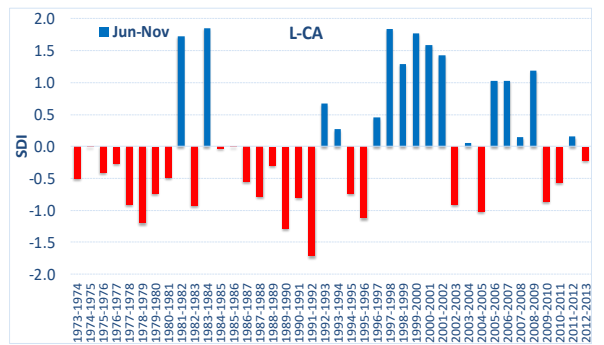
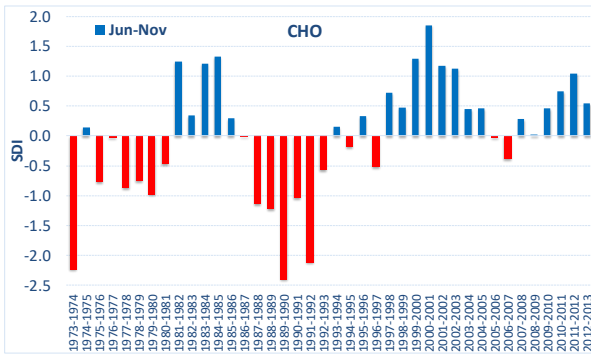
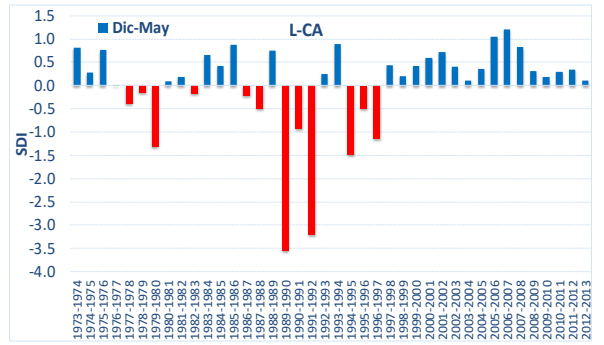
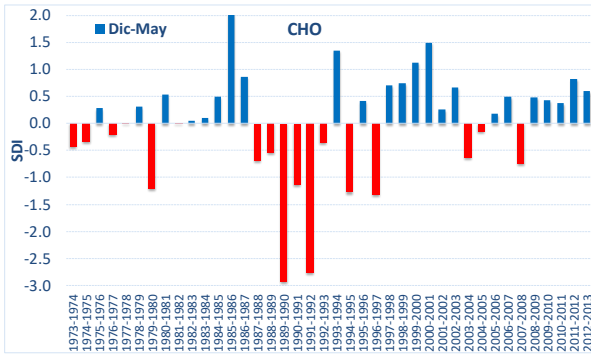
## ANEXO 4: CARACTERÍSTICAS DE LA SEQUÍA HIDROLÓGICA.

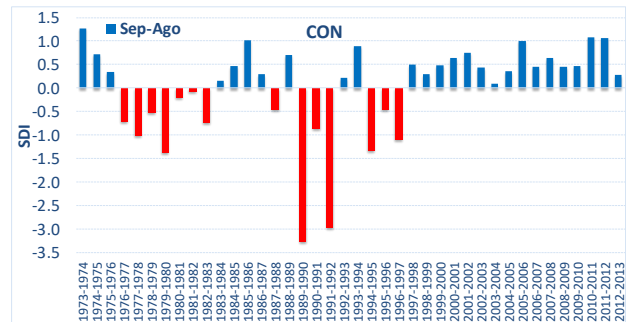
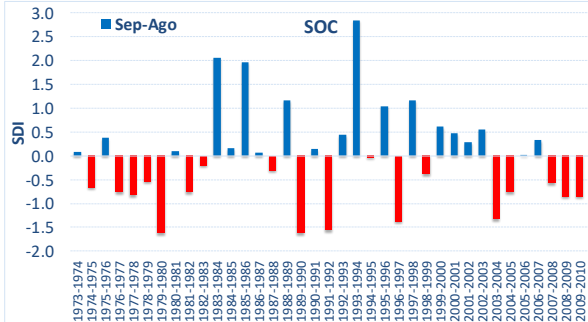
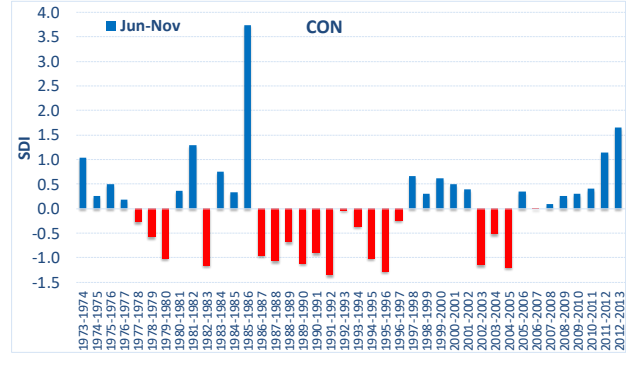
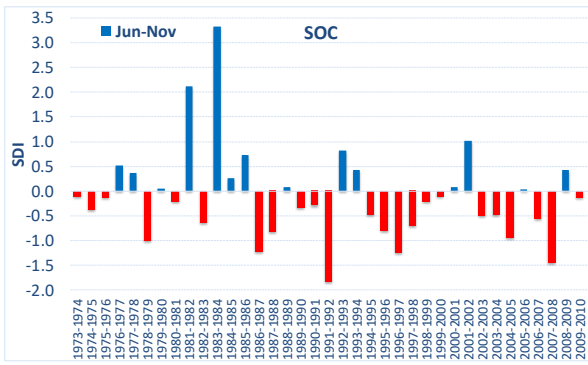
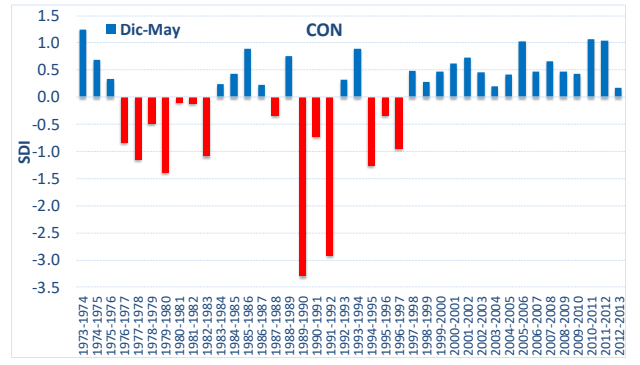
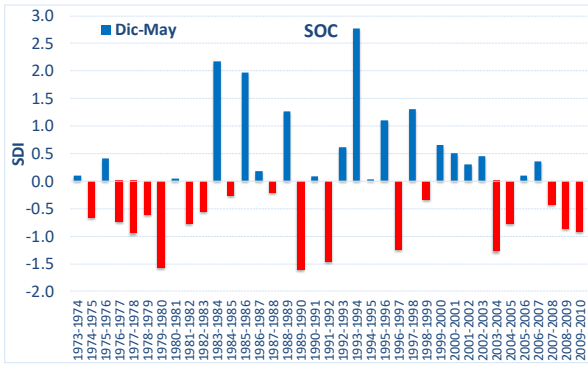
### a) Intensidad, duración y magnitud.

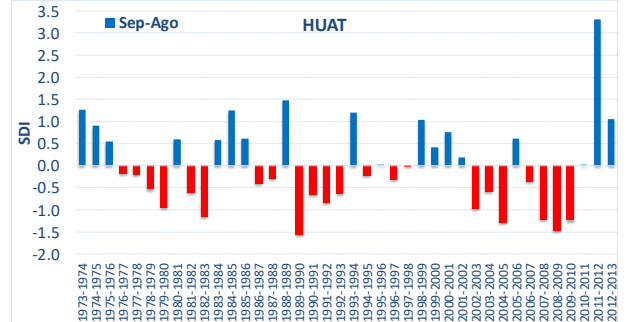
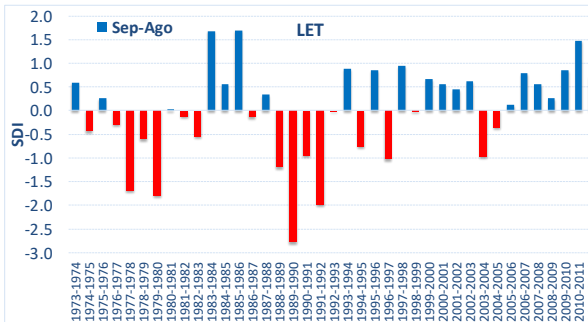
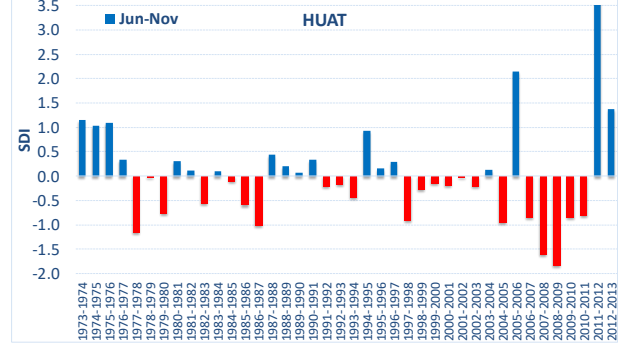
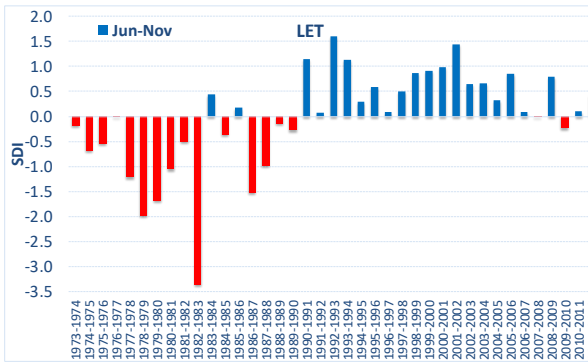
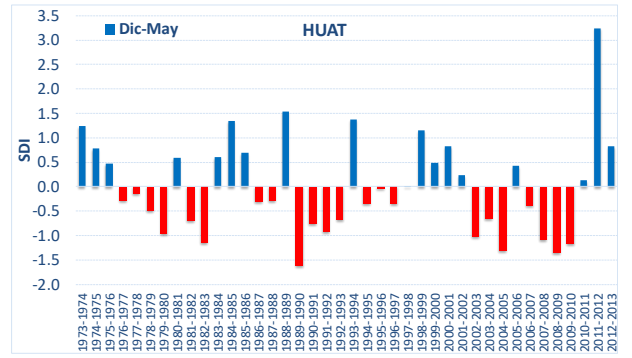
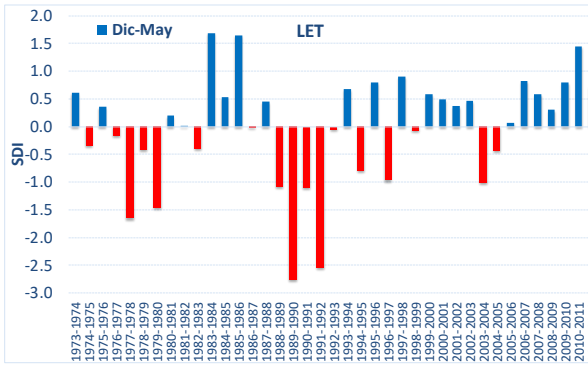


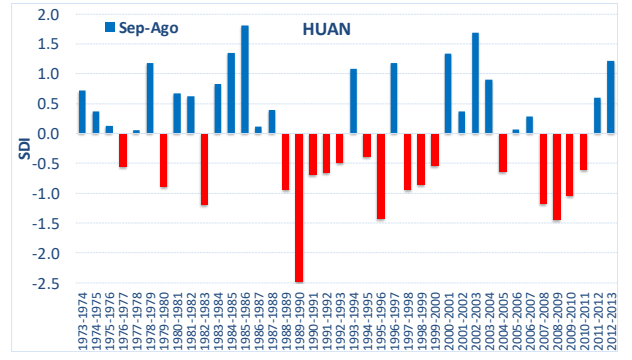
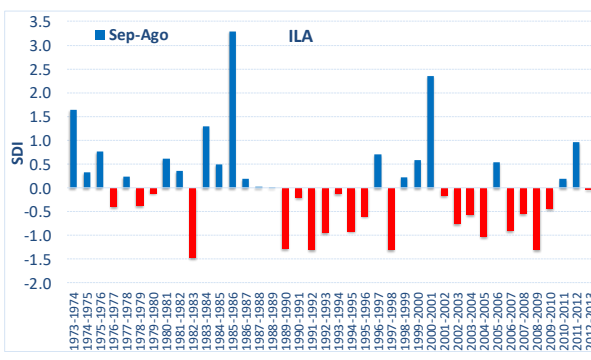
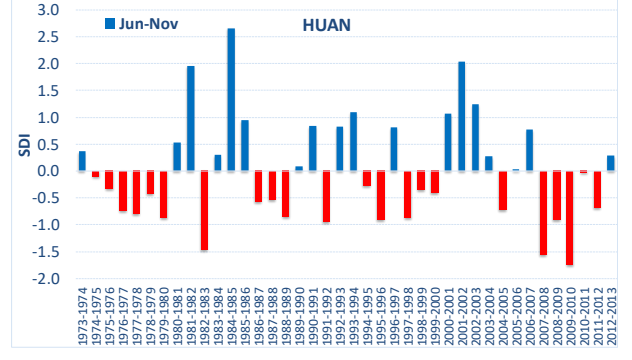
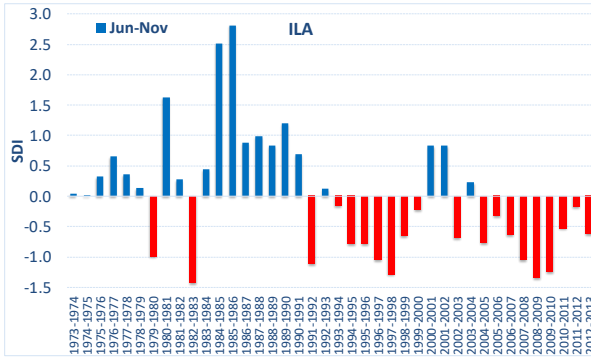
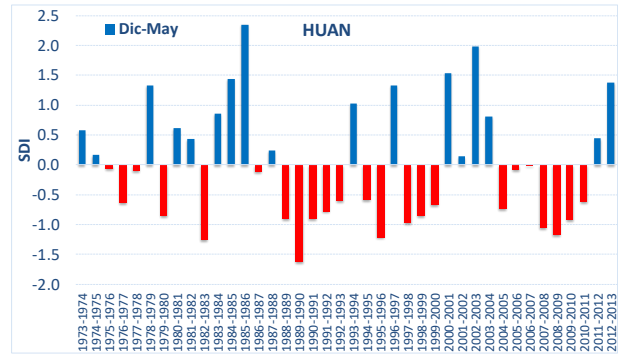
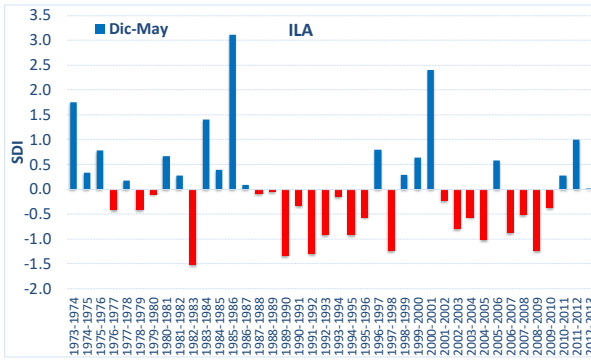




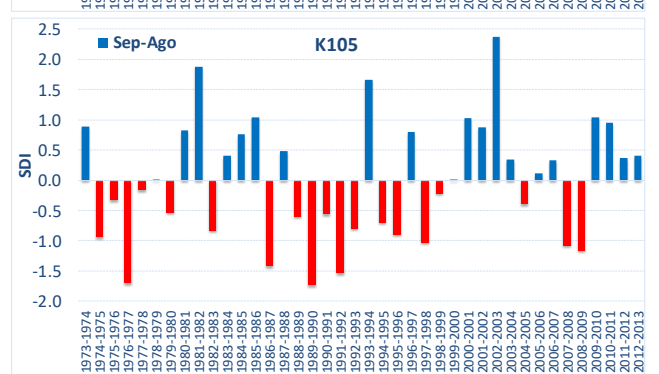
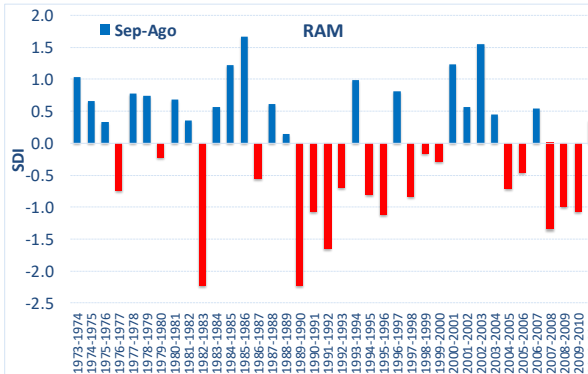
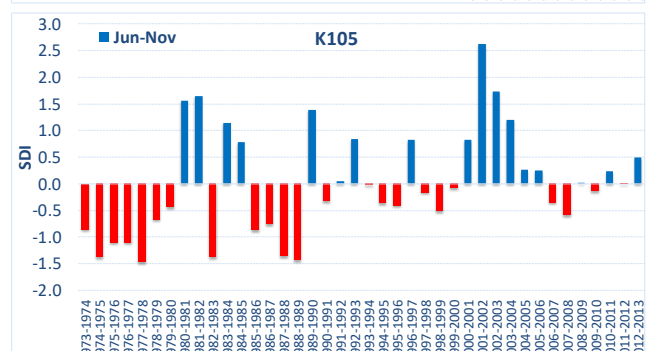
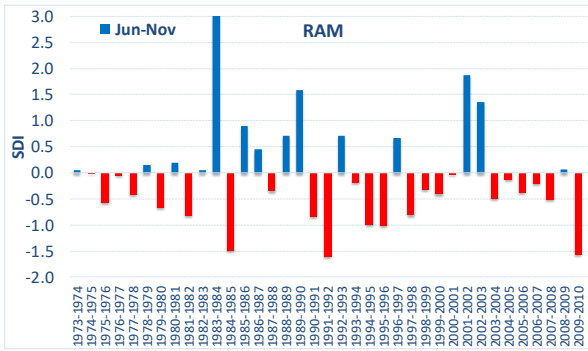
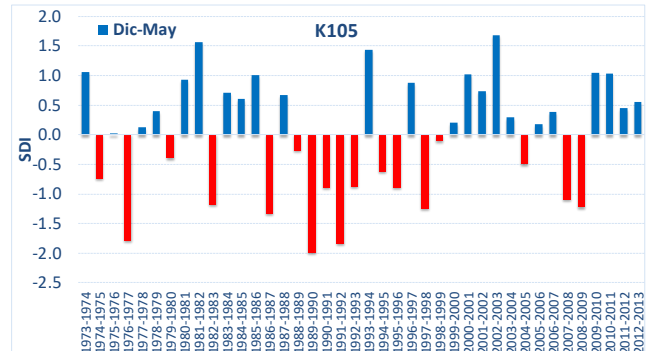
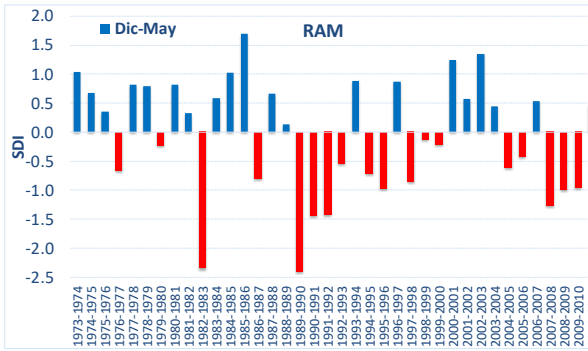


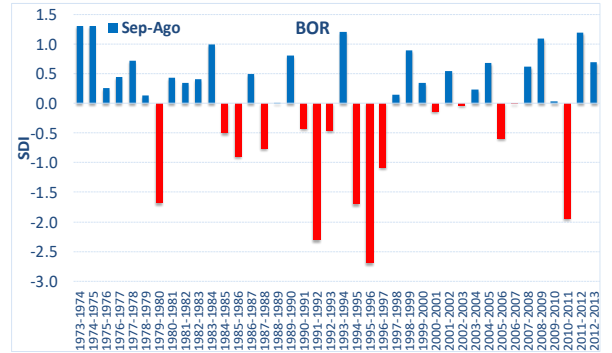
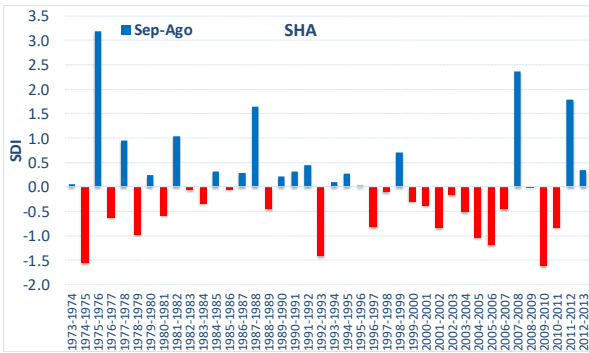
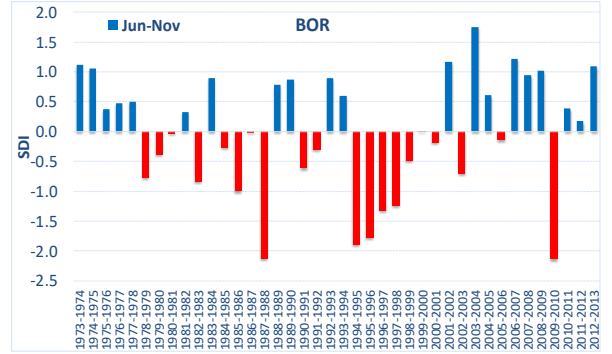
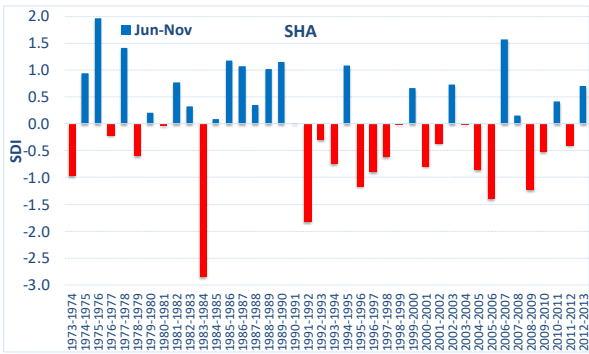
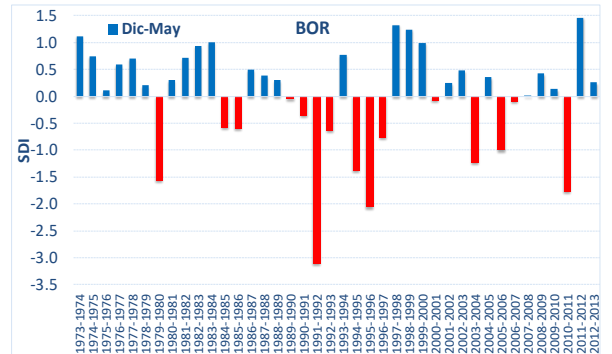
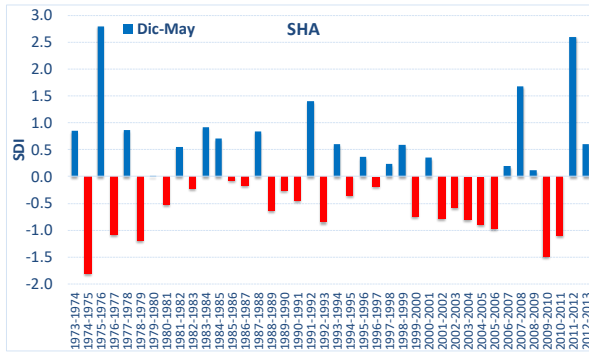


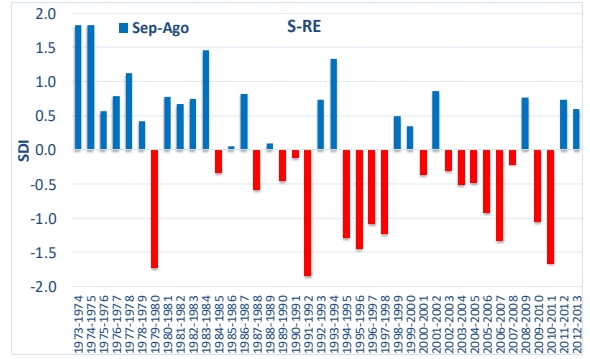
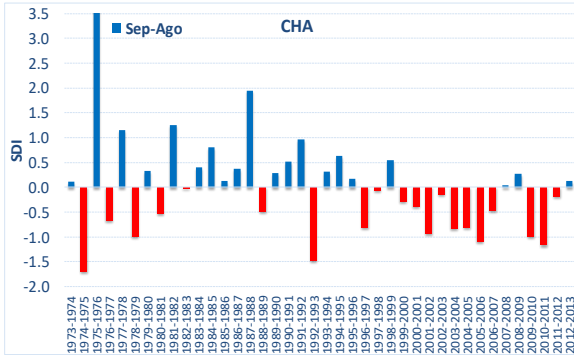
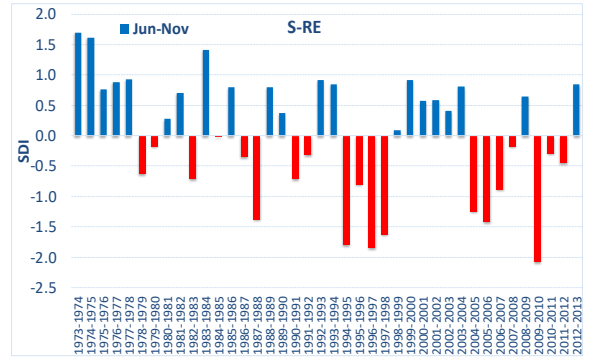
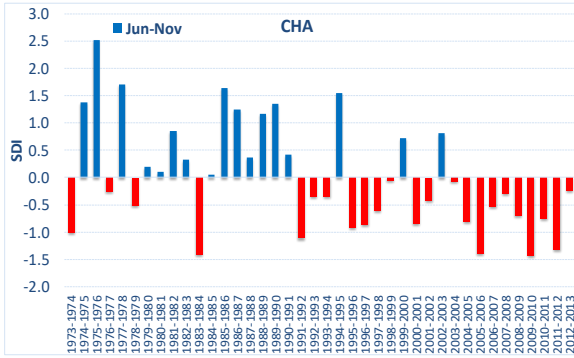
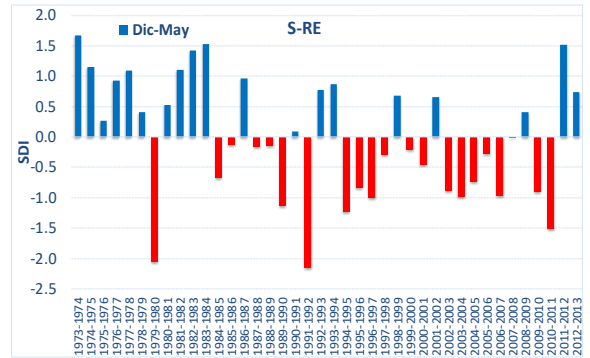
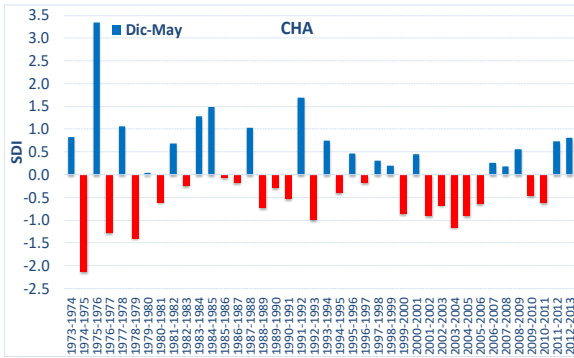


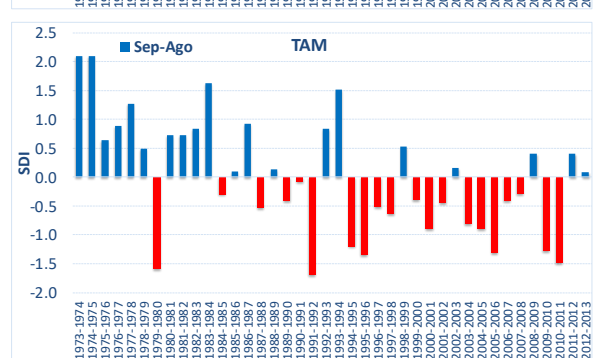
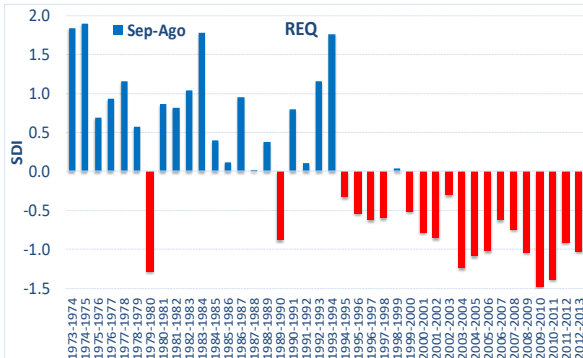
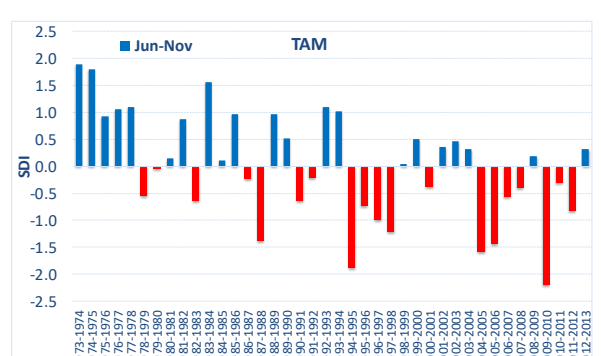
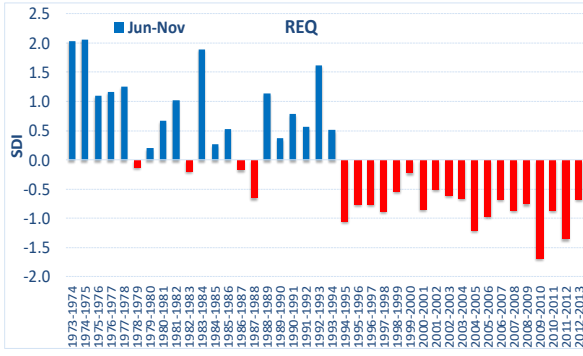
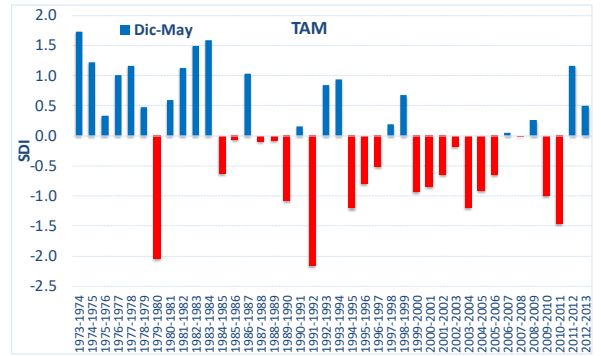
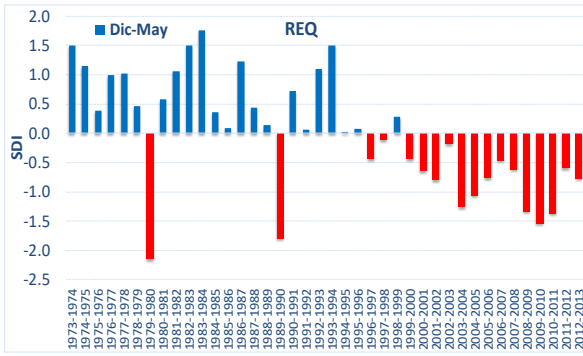












## ANEXO 5: ÍNDICE OCEÁNICO DE EL NIÑO (ONI).

AÑO	DEF	EFM	FMA	MAM	AMJ	MJJ	JJA	JAS	ASO	SON	OND	NDJ
1950	-1.4	-1.2	-1.1	-1.2	-1.1	-0.9	-0.6	-0.6	-0.5	-0.6	-0.7	-0.8
1951	-0.8	-0.6	-0.2	0.2	0.2	0.4	0.5	0.7	0.8	0.9	0.7	0.6
1952	0.5	0.4	0.4	0.4	0.4	0.2	0	0.1	0.2	0.2	0.2	0.3
1953	0.5	0.6	0.7	0.7	0.7	0.7	0.7	0.7	0.8	0.8	0.8	0.7
1954	0.7	0.4	0	-0.4	-0.5	-0.5	-0.5	-0.7	-0.7	-0.6	-0.5	-0.5
1955	-0.6	-0.6	-0.7	-0.7	-0.7	-0.6	-0.6	-0.6	-1	-1.4	-1.6	-1.4
1956	-0.9	-0.6	-0.6	-0.5	-0.5	-0.4	-0.5	-0.5	-0.4	-0.4	-0.5	-0.4
1957	-0.3	0	0.3	0.6	0.7	0.9	1	1.2	1.1	1.2	1.3	1.6
1958	1.7	1.5	1.2	0.8	0.7	0.6	0.5	0.4	0.4	0.5	0.6	0.6
1959	0.6	0.5	0.4	0.2	0.1	-0.2	-0.3	-0.3	-0.1	-0.1	-0.1	-0.1
1960	-0.1	-0.2	-0.1	0	-0.1	-0.2	0	0.1	0.2	0.1	0	0
1961	0	0	-0.1	0	0.1	0.2	0.1	-0.1	-0.3	-0.3	-0.2	-0.2
1962	-0.2	-0.2	-0.2	-0.3	-0.3	-0.2	-0.1	-0.2	-0.2	-0.3	-0.3	-0.4
1963	-0.4	-0.2	0.1	0.2	0.2	0.4	0.7	1	1.1	1.2	1.2	1.1
1964	1	0.6	0.1	-0.3	-0.6	-0.6	-0.7	-0.7	-0.8	-0.8	-0.8	-0.8
1965	-0.5	-0.3	-0.1	0.1	0.4	0.7	1	1.3	1.6	1.7	1.8	1.5
1966	1.3	1	0.9	0.6	0.3	0.2	0.2	0.1	0	-0.1	-0.1	-0.3
1967	-0.4	-0.5	-0.5	-0.5	-0.2	0	0	-0.2	-0.3	-0.4	-0.4	-0.5
1968	-0.7	-0.8	-0.7	-0.5	-0.1	0.2	0.5	0.4	0.3	0.4	0.6	0.8
1969	0.9	1	0.9	0.7	0.6	0.5	0.4	0.5	0.8	0.8	0.8	0.7
1970	0.6	0.4	0.4	0.3	0.1	-0.3	-0.6	-0.8	-0.8	-0.8	-0.9	-1.2
1971	-1.3	-1.3	-1.1	-0.9	-0.8	-0.7	-0.8	-0.7	-0.8	-0.8	-0.9	-0.8
1972	-0.7	-0.4	0	0.3	0.6	0.8	1.1	1.3	1.5	1.8	2	1.9
1973	1.7	1.2	0.6	0	-0.4	-0.8	-1	-1.2	-1.4	-1.7	-1.9	-1.9
1974	-1.7	-1.5	-1.2	-1	-0.9	-0.8	-0.6	-0.4	-0.4	-0.6	-0.7	-0.6
1975	-0.5	-0.5	-0.6	-0.6	-0.7	-0.8	-1	-1.1	-1.3	-1.4	-1.5	-1.6
1976	-1.5	-1.1	-0.7	-0.4	-0.3	-0.1	0.1	0.3	0.5	0.7	0.8	0.8
1977	0.7	0.6	0.4	0.3	0.3	0.4	0.4	0.4	0.5	0.6	0.8	0.8
1978	0.7	0.4	0.1	-0.2	-0.3	-0.3	-0.4	-0.4	-0.4	-0.3	-0.1	0
1979	0	0.1	0.2	0.3	0.3	0.1	0.1	0.2	0.3	0.5	0.5	0.6
1980	0.6	0.5	0.3	0.4	0.5	0.5	0.3	0.2	0	0.1	0.1	0
1981	-0.2	-0.4	-0.4	-0.3	-0.2	-0.3	-0.3	-0.3	-0.2	-0.1	-0.1	0
1982	0	0.1	0.2	0.5	0.6	0.7	0.8	1	1.5	1.9	2.1	2.1
1983	2.1	1.8	1.5	1.2	1	0.7	0.3	0	-0.3	-0.6	-0.8	-0.8
1984	-0.5	-0.3	-0.3	-0.4	-0.4	-0.4	-0.3	-0.2	-0.3	-0.6	-0.9	-1.1
1985	-0.9	-0.7	-0.7	-0.7	-0.7	-0.6	-0.4	-0.4	-0.4	-0.3	-0.2	-0.3
1986	-0.4	-0.4	-0.3	-0.2	-0.1	0	0.2	0.4	0.7	0.9	1	1.1
1987	1.1	1.2	1.1	1	0.9	1.1	1.4	1.6	1.6	1.4	1.2	1.1
1988	0.8	0.5	0.1	-0.3	-0.8	-1.2	-1.2	-1.1	-1.2	-1.4	-1.7	-1.8
1989	-1.6	-1.4	-1.1	-0.9	-0.6	-0.4	-0.3	-0.3	-0.3	-0.3	-0.2	-0.1
1990	0.1	0.2	0.2	0.2	0.2	0.3	0.3	0.3	0.4	0.3	0.4	0.4
1991	0.4	0.3	0.2	0.2	0.4	0.6	0.7	0.7	0.7	0.8	1.2	1.4
1992	1.6	1.5	1.4	1.2	1	0.8	0.5	0.2	0	-0.1	-0.1	0
1993	0.2	0.3	0.5	0.7	0.8	0.6	0.3	0.2	0.2	0.2	0.1	0.1
1994	0.1	0.1	0.2	0.3	0.4	0.4	0.4	0.4	0.4	0.6	0.9	1
1995	0.9	0.7	0.5	0.3	0.2	0	-0.2	-0.5	-0.7	-0.9	-1	-0.9
1996	-0.9	-0.7	-0.6	-0.4	-0.2	-0.2	-0.2	-0.3	-0.3	-0.4	-0.4	-0.5
1997	-0.5	-0.4	-0.2	0.1	0.6	1	1.4	1.7	2	2.2	2.3	2.3
1998	2.1	1.8	1.4	1	0.5	-0.1	-0.7	-1	-1.2	-1.2	-1.3	-1.4
1999	-1.4	-1.2	-1	-0.9	-0.9	-1	-1	-1	-1.1	-1.2	-1.4	-1.6
2000	-1.6	-1.4	-1.1	-0.9	-0.7	-0.7	-0.6	-0.5	-0.6	-0.7	-0.8	-0.8
2001	-0.7	-0.5	-0.4	-0.3	-0.2	-0.1	-0.1	-0.1	-0.2	-0.3	-0.4	-0.3
2002	-0.2	0	0.1	0.2	0.4	0.6	0.8	0.8	0.9	1.1	1.2	1.1
2003	0.9	0.7	0.4	0	-0.2	-0.1	0.1	0.2	0.2	0.3	0.3	0.3
2004	0.3	0.3	0.2	0.1	0.2	0.3	0.5	0.6	0.7	0.7	0.6	0.7
2005	0.7	0.6	0.5	0.5	0.3	0.2	0	-0.1	0	-0.2	-0.5	-0.7
2006	-0.7	-0.6	-0.4	-0.2	0	0	0.1	0.3	0.5	0.7	0.9	0.9
2007	0.7	0.4	0.1	-0.1	-0.2	-0.3	-0.4	-0.6	-0.9	-1.1	-1.3	-1.3
2008	-1.4	-1.3	-1.1	-0.9	-0.7	-0.5	-0.4	-0.3	-0.3	-0.4	-0.6	-0.7
2009	-0.7	-0.6	-0.4	-0.1	0.2	0.4	0.5	0.5	0.6	0.9	1.1	1.3
2010	-0.7	-0.6	-0.4	-0.1	0.2	0.4	0.5	0.5	0.6	0.9	1.1	1.3
2011	-1.3	-1	-0.7	-0.5	-0.4	-0.3	-0.3	-0.6	-0.8	-0.9	-1	-0.9
2012	-0.7	-0.5	-0.4	-0.4	-0.3	-0.1	0.1	0.3	0.3	0.3	0.1	-0.2
2013	-0.4	-0.4	-0.3	-0.2	-0.2	-0.2	-0.3	-0.3	-0.2	-0.3	-0.3	-0.3
2014	-0.5	-0.5	-0.4	-0.2	-0.1	0	-0.1	0	0.1	0.4	0.5	0.6
2015	0.6	0.5	0.6	0.7	0.8	1	1.2	1.4	1.7	2	2.2	2.3
2016	2.2	2	1.6	1.1	0.6	0.1	-0.3					

FUENTE: NOAA

ANEXO 6: MAPA DE RIESGO DE SEQUÍA HIDROLÓGICA - ENOS (LA NIÑA).

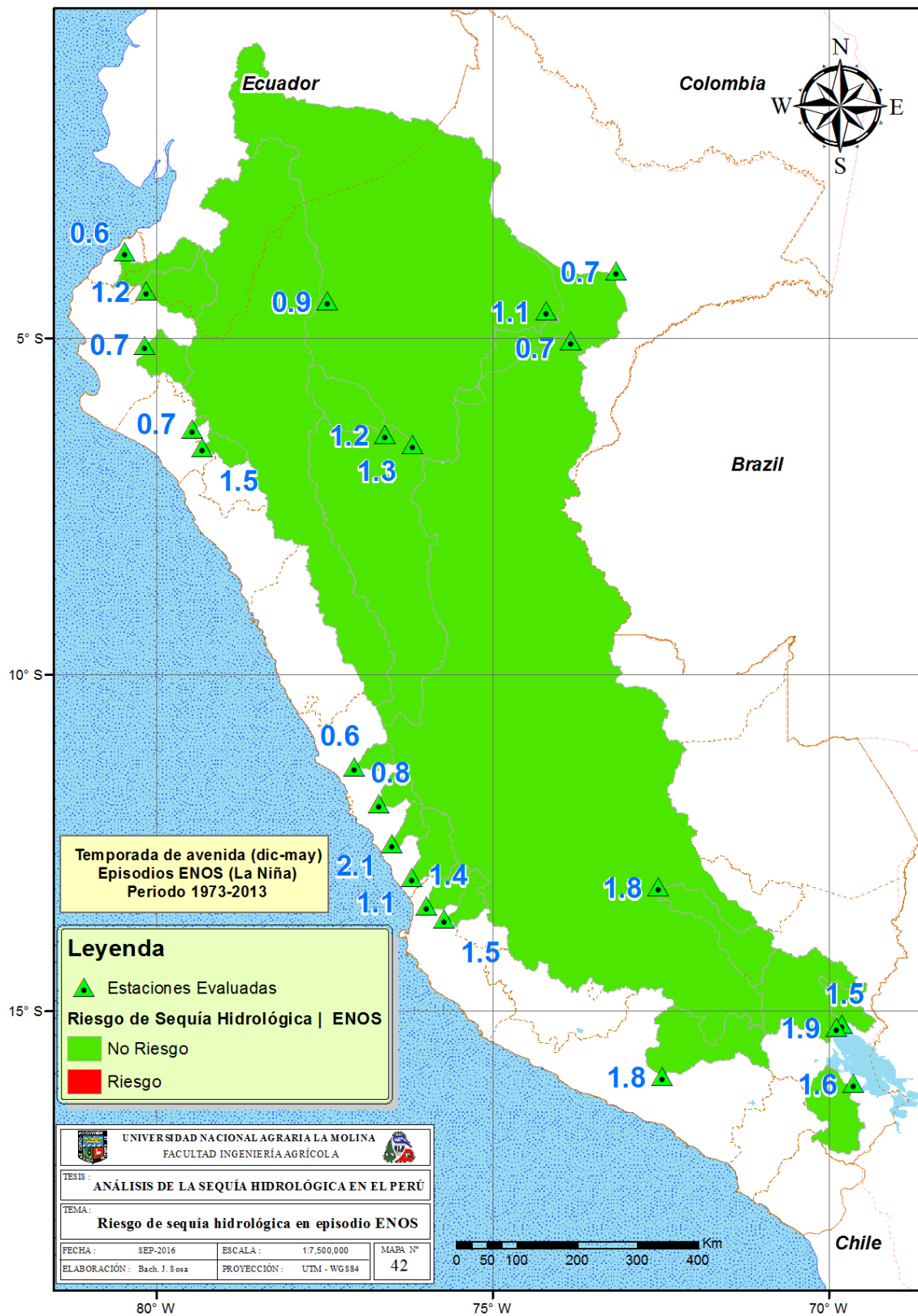
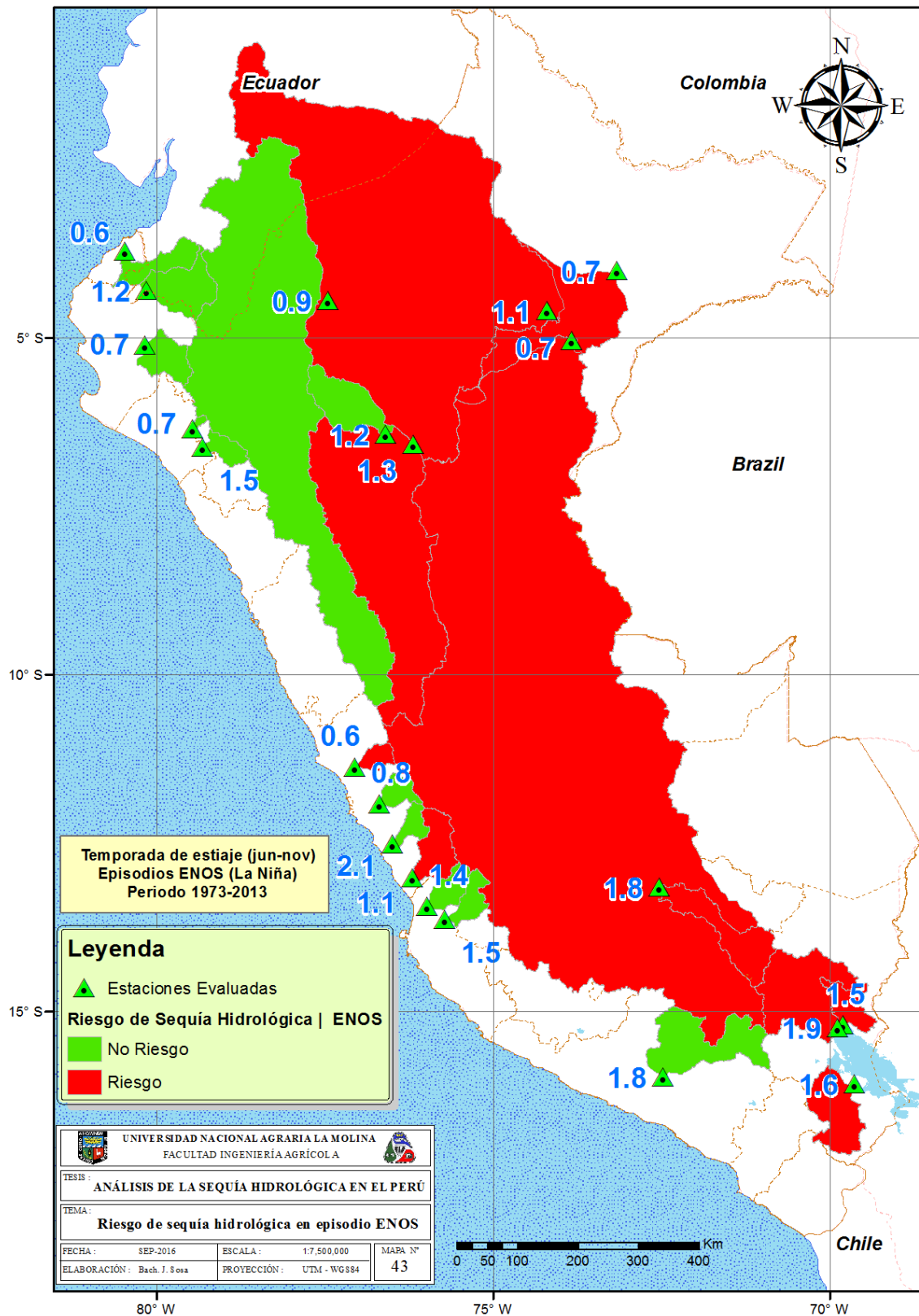


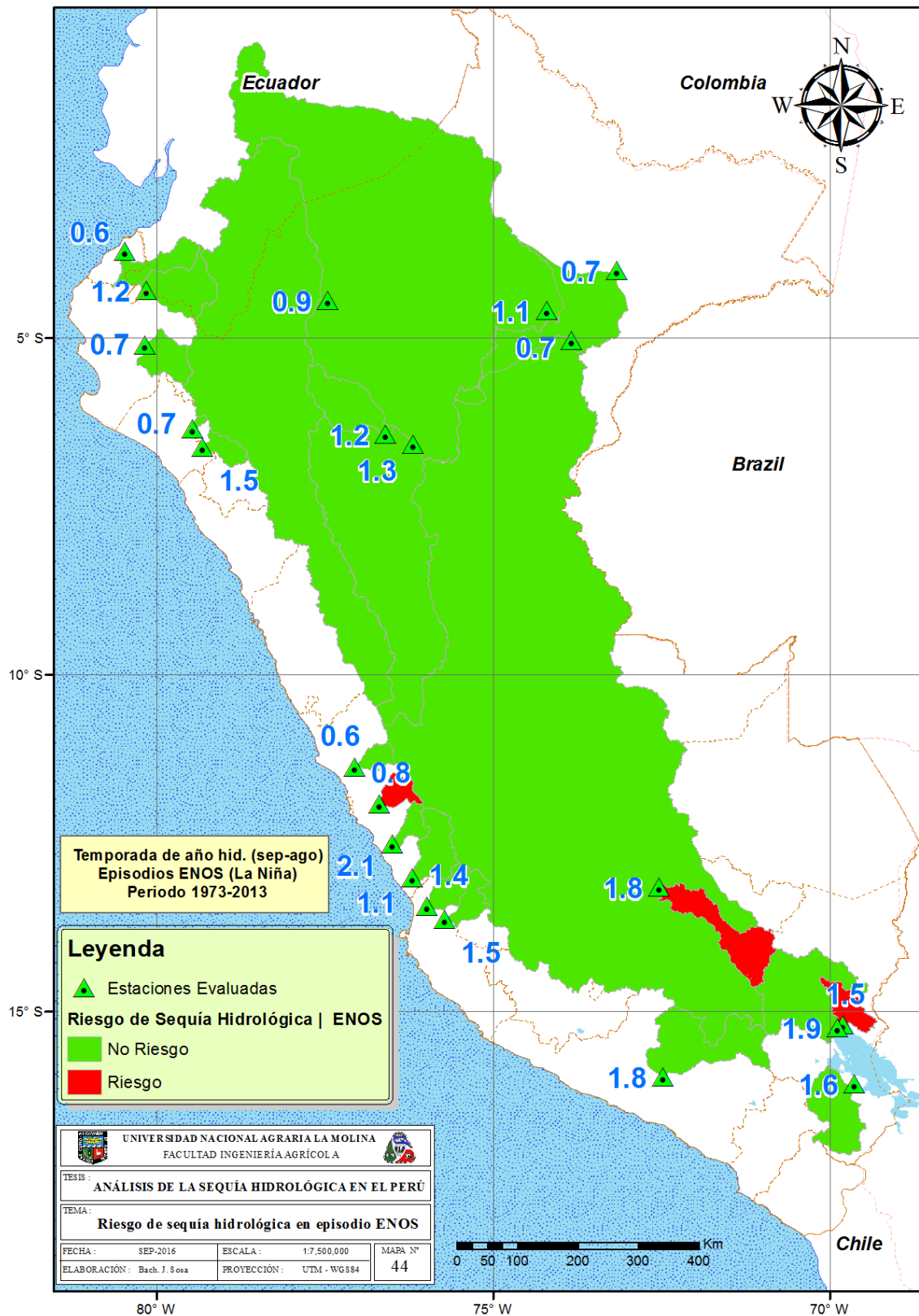
Figura A-6: Mapa de riesgo de sequía hidrológica en episodio ENOS (La Niña) en el temporada de avenidas.

FUENTE: Elaboración propia (2016)



**Figura A-7: Mapa de riesgo de sequía hidrológica en episodio ENOS (La Niña) en el temporada de estiaje.**

FUENTE: Elaboración propia (2016)



**Figura A-8: Mapa de riesgo de sequía hidrológica en episodio ENOS (La Niña) en el temporada del año hidrológico.**

FUENTE: Elaboración propia (2016)



## ANEXO 7: CUADRO COMPARATIVO ENTRE SDI-LLUVIA Y SDI - CAUDALES

### TEMPORADA DE AVENIDA / PERIODO DIC-MAY

AÑO H.	SDI-PP		SDI-PP		SDI-PP		SDI-PP		SDI-PP		SDI-PP		SDI-PP	
	P-ÑA	P-ÑA	RAC	RAC	CHO	CHO	SOC	SOC	CON	CON	LET	LET	HUAT	HUAT
1973-1974	2	1	1	1	0	1	1	0	1	0	1	0	0	0
1974-1975	0	1	0	0	0	1	1	1	0	0	1	1	0	0
1975-1976	0	0	0	1	0	0	0	0	0	0	1	0	0	0
1976-1977	0	1	1	1	0	1	1	1	0	1	0	1	1	1
1977-1978	1	1	3	2	1	1	2	1	1	2	1	3	1	1
1978-1979	1	1	2	1	1	0	1	1	1	1	2	1	2	1
1979-1980	2	1	4	3	2	2	3	3	1	2	1	2	1	1
1980-1981	0	1	1	1	0	0	1	0	1	1	1	0	0	0
1981-1982	2	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	0	2	1
1982-1983	0	0	0	0	1	0	3	1	4	2	3	1	3	2
1983-1984	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	1	0	0	0
1984-1985	2	1	1	3	0	0	1	1	2	0	2	0	1	0
1985-1986	1	1	1	1	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
1986-1987	0	0	0	1	0	0	1	0	1	0	1	1	1	1
1987-1988	2	1	0	1	1	1	1	1	0	1	1	0	1	1
1988-1989	0	0	0	0	0	1	0	0	0	0	0	2	0	0
1989-1990	3	1	4	3	4	4	2	3	1	4	1	4	3	3
1990-1991	2	1	1	1	1	2	1	0	1	1	1	2	0	1
1991-1992	0	1	2	2	3	4	4	2	2	4	2	4	4	1
1992-1993	0	1	0	0	0	1	1	0	0	0	0	1	1	1
1993-1994	0	1	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
1994-1995	1	1	1	1	2	2	2	0	1	2	1	1	1	1
1995-1996	2	1	0	0	1	0	0	0	1	1	1	0	1	1
1996-1997	1	1	1	2	3	2	1	2	2	1	2	1	0	1
1997-1998	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	1	0
1998-1999	0	0	0	0	0	0	0	1	0	0	0	1	0	0
1999-2000	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
2000-2001	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
2001-2002	0	0	0	0	2	0	0	0	0	0	0	0	0	0
2002-2003	1	1	1	1	1	0	1	0	1	0	1	0	1	2
2003-2004	1	1	1	2	1	1	1	2	1	0	1	2	0	1
2004-2005	1	1	1	1	1	1	1	1	2	0	3	1	1	2
2005-2006	0	1	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
2006-2007	1	1	0	0	0	0	0	0	1	0	1	0	0	1
2007-2008	0	0	0	0	1	1	0	1	0	0	0	0	1	2
2008-2009	0	0	0	0	0	0	0	1	0	0	0	0	0	2
2009-2010	0	0	0	0	1	0	1	1	1	0	1	0	1	2
2010-2011	1	1	1	1	0	0	0	1	0	0	0	0	0	0
2011-2012	0	0	0	0	1	0	0	0	0	0	0	0	0	0
2012-2013	1	1	0	0	1	0	0	0	0	0	0	0	0	0

TEMPORADA DE ESTIAJE / PERIODO JUN-NOV

AÑO H.	SDI-PP	SDI-Q	SDI-PP	SDI-Q	SDI-PP	SDI-Q	SDI-PP	SDI-Q	SDI-PP	SDI-Q	SDI-PP	SDI-Q	SDI-PP	SDI-Q	SDI-PP	SDI-Q
	P-ÑA	P-ÑA		RAC		RAC		CHO		CHO		SOC		SOC		CON
1973-1974	0	1	0	0	1	4	1	1	0	0	0	1	0	0	0	
1974-1975	0	1	0	0	1	0	0	1	1	0	1	1	1	1	2	0
1975-1976	1	1	3	1	1	1	1	1	1	0	1	1	1	0	0	0
1976-1977	1	1	1	1	0	1	0	1	0	0	0	0	1	0	0	0
1977-1978	3	1	2	1	0	1	0	0	1	1	1	1	2	0	2	0
1978-1979	3	1	3	1	3	1	3	1	1	1	1	1	3	0	1	0
1979-1980	0	1	0	1	0	1	0	0	1	2	0	3	0	1	0	0
1980-1981	1	1	0	0	0	1	0	1	0	0	0	2	0	0	0	0
1981-1982	0	1	1	0	0	0	0	0	0	0	0	1	0	0	0	0
1982-1983	0	0	0	1	1	0	0	1	1	2	3	4	2	1	0	0
1983-1984	0	1	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
1984-1985	3	1	1	2	0	0	0	0	1	0	2	1	0	1	0	0
1985-1986	1	1	1	0	1	0	1	0	1	0	0	0	0	2	1	0
1986-1987	1	1	0	1	1	1	2	2	1	1	1	3	0	2	0	0
1987-1988	1	1	0	0	2	2	2	1	1	2	3	1	3	0	0	0
1988-1989	1	1	0	0	1	2	1	0	1	1	1	1	4	0	0	0
1989-1990	0	1	0	0	0	4	1	1	1	2	0	1	0	0	0	0
1990-1991	2	1	3	2	1	2	1	1	1	1	1	0	0	0	0	0
1991-1992	1	1	2	1	0	4	1	3	1	2	1	0	1	1	0	0
1992-1993	0	1	0	0	0	1	0	0	1	1	0	0	0	1	0	0
1993-1994	3	1	2	1	1	0	2	0	1	1	3	0	3	1	0	0
1994-1995	2	1	1	1	0	1	1	1	0	2	0	0	0	0	0	0
1995-1996	3	1	0	1	3	0	2	1	1	2	2	0	0	0	0	0
1996-1997	0	1	1	3	0	1	0	2	0	1	0	0	0	0	0	0
1997-1998	0	0	1	1	1	0	2	1	0	0	0	0	0	1	0	0
1998-1999	0	0	0	0	0	0	0	1	0	0	0	0	0	1	0	0
1999-2000	0	0	1	0	0	0	0	1	0	0	0	0	0	1	0	0
2000-2001	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	1	1	0
2001-2002	0	1	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	1	0
2002-2003	1	1	1	1	1	0	2	1	1	2	0	0	3	1	0	0
2003-2004	0	1	0	0	0	0	0	1	1	1	1	0	1	0	0	0
2004-2005	1	1	1	1	4	0	1	1	1	2	2	0	1	1	0	0
2005-2006	0	1	0	1	1	1	0	0	1	0	0	0	0	0	0	0
2006-2007	0	1	0	0	1	1	1	1	1	1	1	0	1	1	0	0
2007-2008	0	0	0	0	1	0	1	2	1	0	1	1	3	3	0	0
2008-2009	1	1	0	1	0	0	0	0	0	0	0	0	1	3	0	0
2009-2010	1	1	2	2	1	0	4	1	1	0	4	1	1	1	0	0
2010-2011	0	0	1	2	0	0	1	0	0	0	0	0	1	1	0	0
2011-2012	0	0	1	1	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
2012-2013	0	1	1	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0

TEMPORADA DE AÑO HIDROLOGICO / PERIODO SEP-AGO

AÑO H.	SDI-PP P-ÑA	SDI-Q P-ÑA	SDI-PP RAC	SDI-Q RAC	SDI-PP CHO	SDI-Q CHO	SDI-PP SOC	SDI-Q SOC	SDI-PP CON	SDI-Q CON	SDI-PP LET	SDI-Q LET	SDI-PP HUAT	SDI-Q HUAT
1973-1974	2	1	1	0	0	2	1	0	1	0	1	0	0	0
1974-1975	0	1	0	0	1	1	1	1	0	0	1	1	0	0
1975-1976	0	1	0	0	1	0	0	0	1	0	1	0	0	0
1976-1977	0	1	2	1	0	1	1	1	0	1	0	1	1	1
1977-1978	2	1	2	2	1	1	2	1	1	1	1	3	1	1
1978-1979	1	1	2	1	1	1	1	1	1	1	2	1	1	1
1979-1980	2	1	4	4	2	2	4	3	1	2	1	3	1	1
1980-1981	0	1	1	1	0	0	1	0	1	1	1	0	0	0
1981-1982	2	1	2	1	1	0	1	1	1	1	1	1	2	1
1982-1983	0	0	0	0	0	0	1	1	3	1	4	1	3	2
1983-1984	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	1	0	0	0
1984-1985	2	1	1	3	0	0	1	0	1	0	2	0	0	0
1985-1986	1	1	1	1	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
1986-1987	0	0	0	1	1	0	1	0	1	0	1	1	1	1
1987-1988	2	1	0	1	1	1	1	1	1	1	1	0	1	1
1988-1989	0	0	0	0	1	1	0	0	0	0	0	2	1	0
1989-1990	3	1	2	2	4	4	2	3	1	4	1	4	3	3
1990-1991	2	1	1	1	0	2	1	0	1	1	1	1	0	1
1991-1992	0	1	2	2	3	4	4	3	3	4	2	3	4	1
1992-1993	0	1	1	0	0	1	1	0	0	0	0	1	1	1
1993-1994	0	1	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
1994-1995	1	1	1	2	2	1	2	1	1	2	2	1	1	1
1995-1996	2	1	0	0	1	0	0	0	1	1	1	0	0	0
1996-1997	1	1	1	3	3	2	1	2	2	2	2	2	0	1
1997-1998	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	1	1
1998-1999	0	0	0	0	0	0	0	1	0	0	0	1	0	0
1999-2000	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
2000-2001	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
2001-2002	0	0	0	0	1	0	0	0	0	0	0	0	0	0
2002-2003	1	1	1	1	1	0	0	0	1	0	1	0	1	1
2003-2004	1	1	1	3	1	1	1	2	1	0	1	1	1	1
2004-2005	1	1	1	0	1	0	1	1	3	0	3	1	2	2
2005-2006	0	1	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
2006-2007	1	1	1	0	0	0	0	0	1	0	1	0	0	1
2007-2008	0	0	0	0	1	1	0	1	0	0	0	0	1	2
2008-2009	0	0	0	0	0	0	0	1	0	0	0	0	1	2
2009-2010	0	1	0	0	1	0	1	1	1	0	0	0	1	2
2010-2011	1	0	1	1	1	0	0	1	0	0	0	0	0	0
2011-2012	0	0	0	0	1	0	0	0	0	0	0	0	0	0
2012-2013	1	1	0	0	1	0	0	0	0	0	0	0	0	0