



Título del Trabajo Fin de Máster:

***POSIBILIDADES DE
IMPLEMENTACIÓN DE UN SISTEMA
DE INDICADORES PARA LA GESTIÓN
DE SEQUÍAS EN LA DEMARCACIÓN
HIDROGRÁFICA DE MANABÍ -
ECUADOR***

Intensificación:

ORDENACIÓN, RESTAURACIÓN Y GESTIÓN DE CUENCAS

Autor:

ZAMBRANO MERA YERIEL ELIZABETH

Director/es:

DR. MIGUEL ÁNGEL PÉREZ MARTÍN

Fecha: JULIO 2014



Título del Trabajo Fin de Máster:

Posibilidades de implementación de un sistema de indicadores para la gestión de sequías en la Demarcación Hidrográfica de Manabí - Ecuador

Autor: **ZAMBRANO MERA, YERIEL ELIZABETH**

Tipo	A <input type="checkbox"/> B <input checked="" type="checkbox"/>	Lugar de Realización	VALENCIA
Director	MIGUEL ÁNGEL PÉREZ MARTÍN	Fecha de Lectura	JULIO, 2014
Codirector1			
Codirector2			
Tutor			

Resumen:

En Ecuador, Manabí es una de las provincias más afectadas por las sequías. Las Naciones Unidas ratifica este hecho, y también la considera como una de las provincias más afectadas por la desertificación. Además basándose en la intensidad del déficit hídrico se estableció que es una zona potencialmente expuesta al evento. La necesidad de prever las sequías es fundamental para evitar que produzcan graves consecuencias. Para esto los gestores utilizan herramientas que permiten monitorear constantemente las condiciones del evento y anticiparse al mismo, como son los índices de sequía.

En el presente estudio, se han seleccionado tres índices de sequía: el Standardized Precipitation Index, SPI; el Palmer Drought Severity Index, PDSI; y el índice de Estado, I.e.; desarrollado por McKee et al. 1983, Palmer 1965 y CHJ 2000, respectivamente. Estos índices fueron aplicados en la Demarcación hidrográfica de Manabí, misma que fue dividida en tres zonas: Zona Norte, Zona Centro y Zona Sur. El análisis de los índices se rigió al periodo 1964 - 2012 (48 años).

Los resultados obtenidos de la aplicación del SPI fueron validados con los registros de prensa que abordan el tema de sequía en la zona de estudio, lo cual permitió establecer la relación entre lo calculado y lo observado. El SPI, reflejó los eventos de sequía acontecidos en la demarcación. En cuanto al I.e., este muestra que los volúmenes de los embalses no alcanzan su nivel mínimo.

Finalmente se contrastaron los resultados del Índice de Precipitación Estandarizada con los resultados de los índices climáticos; Southern Oscillation Index, SOI; y Sea Surface Temperature, SST; para determinar la influencia de los eventos climáticos El Niño - Southern Oscillation, ENSO; con la manifestación de la sequía en la Demarcación Hidrográfica de Manabí, se estableció el índice climático SST como un buen indicador de las sequías en la demarcación.

Abstract

In Ecuador, Manabi is one of the provinces most affected by droughts. The UN confirms this fact, and also considers it as one of the provinces most affected by desertification. Furthermore, on the basis of the intensity of water scarcity, it was established that this is an area potentially at risk of such an event.

The need to predict droughts is essential to avoid serious consequences. In this respect, drought managers have a series of tools (e.g. drought indices) to constantly monitor event conditions and anticipate these occurrences.

Three drought indices have been selected in this study: the Standardized Precipitation Index, SPI; the Palmer Drought Severity Index, PDSI; and the Index of State, I.e., developed by McKee et al. 1983, Palmer 1965 and CHJ 2000, respectively. These indices were applied at the level of the river basin district of Manabi, which was divided into three zones: North Zone, Central Zone and South Zone. The analysis of the indices encompassed the period between 1964 - 2012 (48 years).

The results obtained from the application of the SPI were validated with the written records from the local press addressing the issue of droughts in the study area. This allowed us to establish the relationship between the calculated and the observed values. The SPI exposed the drought events occurred in the district. Similarly, I.e. index shows that the volumes of the reservoirs do not reach their minimum levels.

Finally, the results of the Standardized Precipitation Index were compared with the results of the climate indices; Southern Oscillation Index, SOI; and Sea Surface Temperature, SST; to determine the influence of El Niño - Southern Oscillation, ENSO climatic events; with the manifestation of drought at the level of the river basin district of Manabi, and was established the climate index SST as a good indicator of drought in the district.

Resum

A l'Equador, Manabí és una de les províncies més afectades per les sequeres. Les Nacions Unides ratifica aquest fet, i també la considera com una de les províncies més afectades per la desertificació. A més basant-se en la intensitat del dèficit hídric es va establir que és una zona potencialment exposada a l'esdeveniment. La necessitat de preveure les sequeres és fonamental per evitar que es produeixin greus conseqüències. Per això els gestors utilitzen eines que permeten monitoritzar constantment les condicions de l'esdeveniment i anticipar-se al mateix, com són els índexs de sequera.

En el present estudi, s'han seleccionat tres índexs de sequera; el Standardized Precipitation Index, SPI; el Palmer Drought Severity Index, PDSI; i l'índex d'Estat, I.e.; desenvolupat per McKee et al. 1983, Palmer 1965 i CHX 2000, respectivament. Aquests índexs van ser aplicats a la Demarcació hidrogràfica de Manabí, mateixa que va ser dividida en tres zones: Zona Nord, Zona Centre i Zona Sud. L'anàlisi dels índexs es va regir al període 1964 - 2012 (48 anys).

Els resultats obtinguts de l'aplicació de SPI van ser validats amb els registres de premsa que aborden el tema de sequera a la zona d'estudi, la qual cosa va permetre establir la relació entre el calculat i l'observat. La SPI, va reflectir els esdeveniments a la demarcació. Pel que fa al I.e, aquest mostra que els volúmenes dels embassaments no arriben al seu nivell mínim.

Finalment es van contrastar els resultats de l'Índex de Precipitació estandarditzada amb els resultats dels índexs climàtics; Southern Oscillation Index, SOI; i Sea Surface Temperature, SST; per determinar la influència dels esdeveniments climàtics del Nen - Southern Oscillation, ENSO; amb la manifestació de la sequera a la demarcació hidrogràfica de Manabí, es va establir l'índex climàtic SST com un bon indicador de les sequeres a la demarcació.

Palabras clave:

Sequía / Índices de Sequía / SPI / PDSI / I.e. / Eventos Climáticos ENSO

AGRADECIMIENTOS

Primero y antes que nada, le agradezco a Dios, por estar conmigo en cada paso que doy y por darme las fuerzas para seguir adelante y alcanzar mis metas.

Quiero agradecer hoy y siempre a mi familia. A mis padres Dr. Augusto Zambrano y Abg. Betty Mera, mis hermanos Carlos, Bruno y Johanna, gracias por su amor desmedido y por confiar en mí incondicionalmente.

Agradezco de manera especial al Gobierno Nacional del Ecuador, a la Secretaría Nacional de Educación Superior, Ciencia, Tecnología e Innovación - SENESCYT y al Instituto Ecuatoriano de Crédito Educativo y Becas - IECE; por apostar a la superación de los profesionales mediante el otorgamiento de becas. Gracias por el apoyo y financiamiento brindado para la realización de mis estudios.

De igual manera, mi más sincero agradecimiento al director del Máster Dr. Eduardo Cassiraga por todo su apoyo y colaboración en el transcurso de mis estudios.

Al Dr. Miguel Ángel Pérez Martín, director del Trabajo de Fin de Máster, por su orientación, seguimiento y supervisión continua; gracias a ello fue posible culminar con éxito y satisfacción la presente investigación.

Finalmente le doy gracias a todos y cada uno de mis amigos, compañeros y docentes por contribuir a mi superación profesional y ser parte de este logro académico.

Yeriel Elizabeth Zambrano Mera

1. INTRODUCCIÓN Y OBJETIVOS	1
2. ÁMBITO DE ESTUDIO	3
2.1. Descripción física	4
2.2. Clima	7
2.3. Recursos Hídricos	9
2.4. Demandas	12
2.5. Estaciones de registros climáticos	13
3. ESTADO DEL ARTE	15
3.1. Conceptualización de la Sequía	15
3.2. Índices de Sequías	21
3.3. Índices Aplicados	25
3.4. Aplicación de índices para la evaluación y seguimiento de la Sequía	32
3.5. Sequía y sus efectos en Ecuador y Manabí	40
3.6. Eventos climáticos ENSO	45
3.7. Índices Climáticos	47
4. METODOLOGÍA	51
4.1. Revisión y selección de índices de sequía	53
4.2. Aplicación de los índices de sequía	54
4.3. Validación de los resultados	57
4.4. Contraste de índices de sequía con índices climáticos	57
5. APLICACIÓN Y RESULTADOS	58
5.1. Revisión y selección de índices de sequía	58
5.2. Aplicación de índices	65
5.3. Validación de los resultados	76
5.4. Contraste de los índices de sequía con los índices climáticos	78
6. CONCLUSIONES	83
7. LÍNEAS DE INVESTIGACIÓN	86
8. REFERENCIAS	87

1. INTRODUCCIÓN Y OBJETIVOS

La sequía es un fenómeno natural que afecta mucho más que cualquier otro desastre natural (FAO 2013). Los períodos de sequía pueden ser de corto a largo plazo, estos períodos pueden implicar drásticas consecuencias para el medio ambiente, la agricultura, la economía y la sociedad. Los efectos varían dependiendo de la vulnerabilidad.

La causa inicial de toda sequía es la escasez de precipitaciones (sequía meteorológica) lo que deriva en una insuficiencia de recursos hídricos (sequía hidrológica) necesarios para abastecer la demanda existente. Por ello, no hay una definición de sequía universalmente aceptada, pues difiere de un lugar a otro, e incluso cada usuario del agua tiene su propia concepción. La literatura científica contempla más de 150 definiciones de sequía diferentes.

En los últimos años, se han observado sequías intensas a gran escala, que afectan a grandes zonas a nivel mundial, de allí el creciente interés por desarrollar y aplicar indicadores de sequías que permitan monitorear constantemente las condiciones del evento y proporcionar información actualizada sobre regiones afectadas.

Además diversos estudios se han realizado para establecer si existen vínculos entre los eventos climáticos El Niño - Oscilación del Sur (El Niño-Southern Oscillation, ENSO) y las anomalías del clima; con el fin de ayudar a la predicción de sequías, inundaciones y tormentas tropicales (huracanes).

En las últimas décadas Ecuador ha incurrido en pérdidas de más de \$ 4 mil millones por causa de la sequía, una de las provincias más afectadas por el evento es Manabí, con cuatro sequías en doce años desde 1988. En el 2009 las pérdidas en el sector agrícola alcanzarían la cifra de \$ 262 millones (FAO Ec, 2010). Situación que motiva a la realización de esta investigación.

Hay que señalar que la información sobre las sequías en Ecuador es sumamente limitada, sólo hay registros de este evento a partir del año 1988. La ejecución del estudio se vio condicionada a la información disponible y a la consecuente generación de la misma.



La presente investigación tiene como objetivo general estudiar las posibilidades de implementar un sistema de indicadores para la gestión de sequías en la Demarcación Hidrográfica de Manabí - Ecuador. Para ello será necesario dar cumplimiento a los siguientes objetivos específicos:

- Analizar datos climatológicos históricos para establecer las características climáticas del ámbito de estudio y aplicar los índices de sequía; Standardized Precipitation Index (SPI), Palmer Drought Severity Index (PDSI) e Índice de Estado (I.e) para evaluar la sequía meteorológica, agrícola y operativa respectivamente.
- Validar los resultados del Standardized Precipitation Index, SPI; con los registros de prensa que abordan el tema de sequía en el ámbito de estudio. Finalmente contrastar los índices aplicados con los índices climáticos Southern Oscillation Index, SOI y Sea Surface Temperature, SST; para establecer la relación entre los eventos climáticos ENSO y la manifestación de la sequía en la Demarcación Hidrográfica de Manabí (DHM).

2. ÁMBITO DE ESTUDIO

Demarcación Hidrográfica de Manabí

La Demarcación Hidrográfica de Manabí (DHM) se ubica al oeste de Ecuador, cubriendo una extensión de 11483.68 km², ubicada en el sexto lugar respecto al tamaño de las Demarcaciones Hidrográficas del Ecuador. Fue establecida y delimitada según el Acuerdo 66-2010 de la Secretaría Nacional del Agua (SENAGUA), misma que ejerce la planificación y gestión integrada de los recursos hídricos en el territorio nacional.



Figura 1: Demarcaciones Hidrográficas del Ecuador. Elaboración propia.

Está formada por diecisiete cuencas hidrográficas las cuales corresponden a cuatro centros zonales de administración. Incluye a tres de las veinticuatro provincias del Ecuador, siendo Manabí la provincia con mayor territorio en la demarcación con un porcentaje de 97,7%, el restante 2,3% lo ocupan las provincias de Santa Elena (1,1%) y Esmeraldas (1,2%). Cuenta con una población aproximada de 1.149.748 habitantes correspondiente al 7,9% de la población nacional.

PROVINCIA	Área ocupada por la DHM (Km ²)	Área total de la Provincia (Km ²)	% de la DHM
MANABÍ	11192.95	18947.33	97.7%
ESMERALDAS	147.18	16077.79	1.2%
SANTA ELENA	135.35	3696.96	1.1%

Tabla 1: Área de las provincias que conforman la DHM.

2.1. Descripción física

La Demarcación Hidrográfica de Manabí (DHM), se caracteriza por ser una demarcación que no recibe aguas provenientes del deshielo de los nevados de la Cordillera de los Andes, ya que al este de la demarcación existe una cordillera costanera de pequeñas montañas llamada “Cordillera de Chongón y Colonche” que impide dicho escurrimiento, dicha cordillera es considerada la columna vertebral de la región. La DHM además se caracteriza por tener como efluente de todos sus ríos el Océano Pacífico.

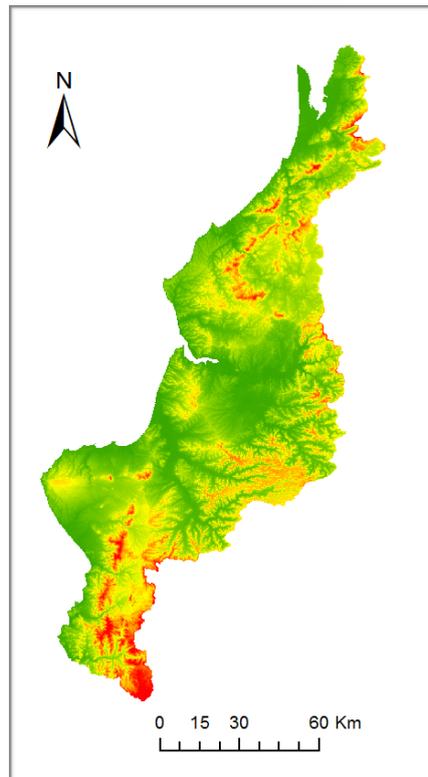


Figura 2: Modelo digital del terreno de la DHM. Elaboración propia.

Al encontrarse la DHM en provincias de la zona costanera, sus elevaciones máximas no pasan los 700 msnm; tales elevaciones se sitúan al norte en las

cuencas del río Jama en las zonas de cabeceras de las cuencas del río Chone y río Portoviejo, así como en la parte sur de la demarcación. Todas estas cadenas de elevaciones son producto de las diversas formaciones geológicas existentes en la zona, siendo las de mayor afloramiento las formaciones Borbón y Onzole en partes altas; Tosagua y Angostura en la zona norte, Cayo al sur en la parte media; y formaciones de depósitos aluviales en las zonas bajas de la DHM.

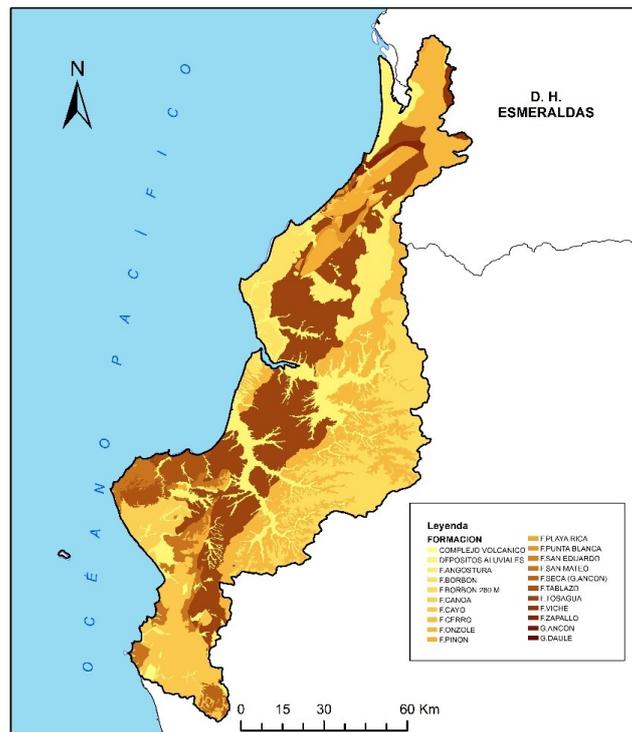


Figura 3: Formaciones geológicas de la DHM. Elaboración propia.

Producto de estas cadenas montañosas se forma la gran red hídrica que tiene esta demarcación. De las que resaltan el río Portoviejo, el río Chone y el río Jama, los cuales desembocan en el Océano Pacífico. El río Chone se diferencia de los demás, por formarse en su desembocadura, un estuario; mismo que es controlado mediante una pequeña presa que impide el ingreso de agua marina hacia el río.

El uso de suelo predominante en la DHM es el agropecuario con un 67%, seguido de bosques y vegetación arbustiva con un 18.8% y 10.3% respectivamente, ocupando el restante 3.7% los usos antrópicos, las asociaciones agropecuarias, eriales y cuerpos de agua. Dentro de este último

grupo se encuentra el sector acuicultor que utiliza el agua del estuario del río Chone para sus fines. El representativo 67% refleja que la mayor actividad económica de la zona es agropecuaria, sector importante en la economía de la provincia.

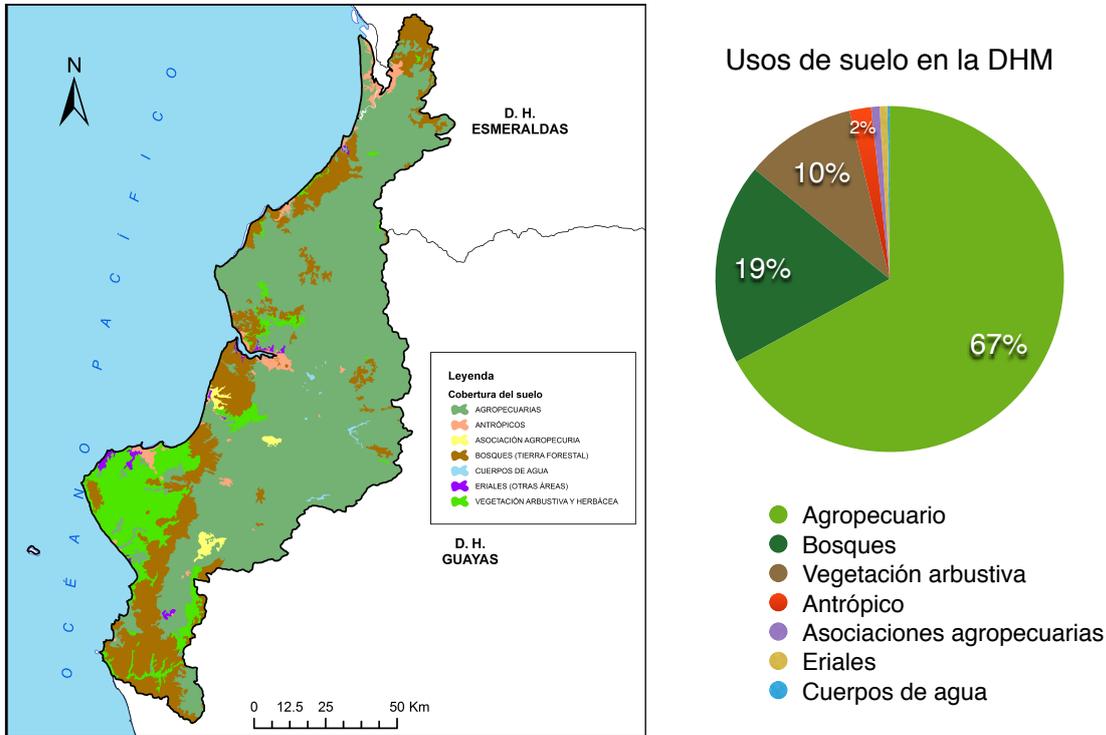


Figura 4: Usos de suelo en la DHM. Elaboración propia.

En la DHM existen ciertas áreas que por su naturaleza son protegidas, la mayor parte de ellas perteneciente a bosques de diversos tipos. Entre estas áreas encontramos un Humedal RAMSAR “La Segua”, el mismo que en un principio (85 años atrás) formaba parte del estuario del río Chone con abundantes pantanos y manglares. Con la deforestación de la parte media de la cuenca del río Chone y el acarreo de abundante sedimento, se produjo una separación del estuario convirtiéndose en el humedal de agua dulce que es en la actualidad. Tiene una extensión de 1742 ha, en el año 2000 fue declarado área protegida para la conservación de la naturaleza y la investigación debido al gran número de especies de aves y peces existentes en él.

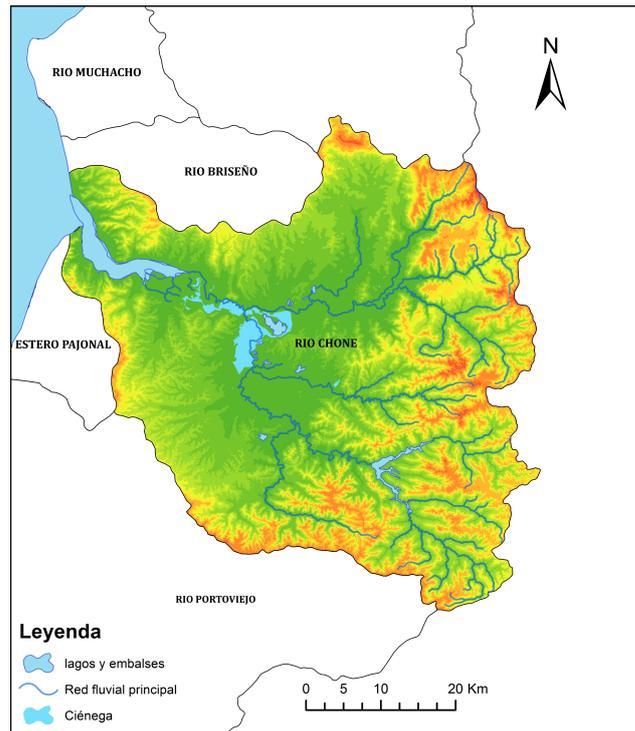


Figura 5: Cuenca del río Chone en la DHM, ubicación del humedal RAMSAR “La Segua”. Elaboración propia.

2.2. Clima

La Demarcación Hidrográfica de Manabí al estar ubicada en las latitudes 1° N y 1° S tiene características climáticas especiales, como por ejemplo; poseer 12 horas de sol constantes durante todo el año, y la presencia de un clima agradable entre templado subtropical, seco subtropical y tropical húmedo. La cercanía al Océano Pacífico es otro factor climático importante debido a las corrientes marinas que circulan todo el año por la línea ecuatorial, unas de las corrientes que más afectan a la demarcación son las corrientes de “El Niño y La Niña”. Además solo se diferencian dos temporadas estacionales, una lluviosa (invierno) comprendida de Diciembre a Mayo y una seca (verano) que va de Julio a Noviembre, teniendo a Julio y Diciembre como meses de transición entre las estaciones.

La temperatura promedio de la demarcación varía entre los 24 °C y 26 °C, variando espacialmente de oeste a este de menos a más. La temperatura presenta un aumento y una disminución gradual en las temporadas invierno y verano respectivamente.

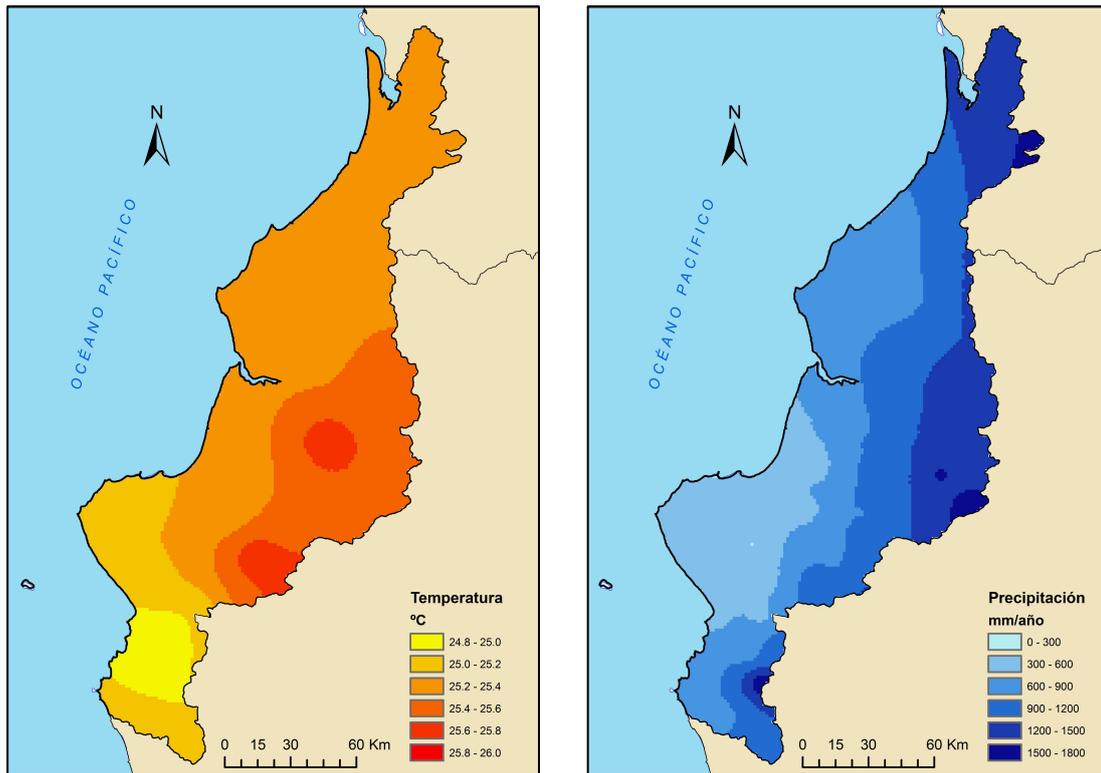


Figura 6: Distribución espacial de la temperatura y precipitación anual. Elaboración propia

Tanto la precipitación como la temperatura varían temporal y espacialmente. Así en el año, la precipitación puede presentar una variación de 300 a 1800 mm, teniendo las máximas precipitaciones en las zonas de altas montañas. El periodo de lluvias se produce de Diciembre a Mayo, teniendo pequeñas lloviznas (no alcanzan los 50 mm/mes) el resto del año.

Las precipitaciones tienden a ser similares cada temporada, exceptuando los años en que se produce el fenómeno climático de “El Niño”. Estos años pueden registrar el doble de la precipitación normal, de igual manera, el periodo de lluvias puede extenderse durante todo el verano teniendo así un mínimo de 12 meses continuos de lluvias; conllevando al colapso de los sistemas de control de inundaciones y en consecuencia desencadenarlas principalmente en las zonas bajas del centro de la demarcación.

Según el índice de humedad de la UNESCO, la mayor parte de la demarcación se encuentra en estado subhúmedo a húmedo, exceptuando la zona suroeste que presenta condiciones semiáridas. Situación que refleja los tipos de clima del área de estudio.

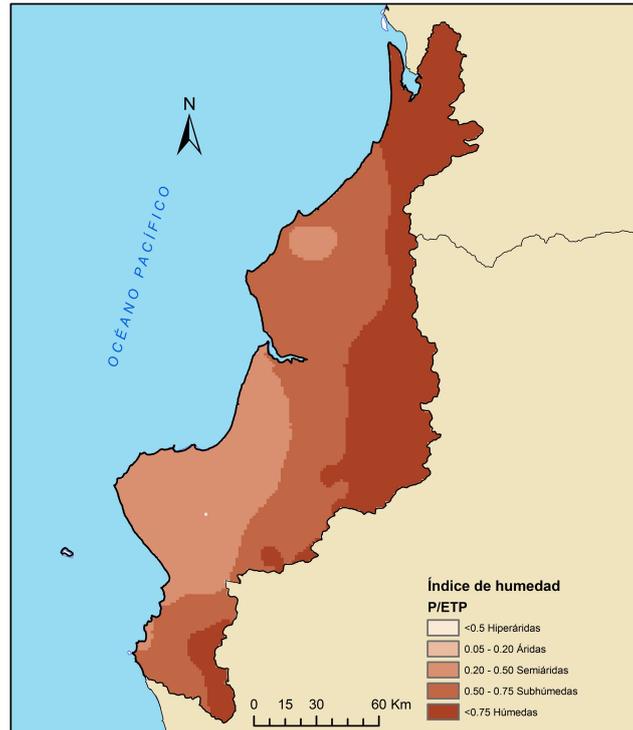


Figura 7: Mapa de Índice de Humedad de la UNESCO para la DHM. Elaboración propia

2.3. Recursos Hídricos

Los recursos hídricos en la DHM dependen de las precipitaciones que se presentan en esta y de la capacidad de almacenamiento de agua subterránea, como se mencionó anteriormente, la demarcación no recibe agua proveniente del deshielo de los nevados, teniendo así solo dos orígenes; superficiales y subterráneos.

Los recursos hídricos superficiales se utilizan generalmente en las zonas ribereñas, donde el fácil acceso permite el consumo humano y agrícola (riego). El uso técnico del recurso (plantas potabilizadoras y canales de riego) inició en la década de los 70 cuando se empezaron a construir embalses en la demarcación.

Para disponer constantemente de los recursos hídricos, las instituciones encargadas de la gestión del recurso optaron por la construcción de embalses con fines de regulación de caudales para el invierno y almacenamiento para riego para el verano. La capacidad de almacenamiento superficial en la demarcación es 550 hm³ dividida en 2 embalses.

El primer embalse construido fue “Poza Honda” en el año 1971. Está ubicado en la cabecera de la cuenca del río Portoviejo, tiene una capacidad de almacenamiento de 100 hm³, su principal objetivo es el abastecimiento urbano y agrícola.

“La Esperanza” (segundo embalse) se construyó en 1995 en la cabecera de la subcuenca del río Carrizal (cuenca del río Chone), tiene una capacidad de 450 hm³. Los fines para los que fue construido son: regulación de avenidas, abastecimiento de agua potable y agua para riego.

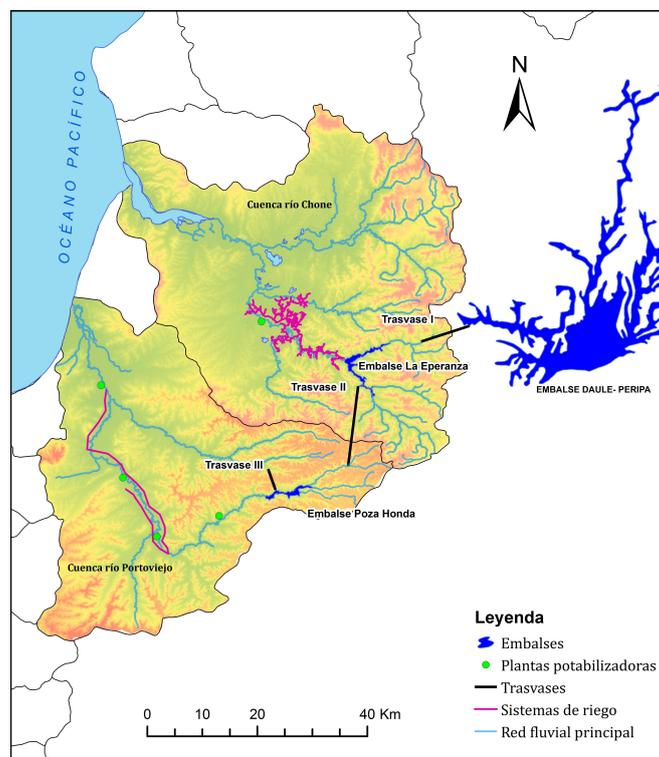


Figura 8: Infraestructuras para la gestión hídrica de la DHM. Elaboración propia

Con el objetivo de suplir demandas en periodos secos se optó por construir un sistema de tres trasvases.

El primero que nace en el embalse Daule - Peripa perteneciente a la Demarcación hidrográfica del Guayas y termina en el embalse La Esperanza. Este trasvase funciona gravitacionalmente utilizando un sistema de apertura de compuertas de túneles.

El segundo empieza en el embalse La Esperanza y mediante un sistema de bombeo conduce el agua por un acueducto y luego por un túnel hasta el embalse Poza Honda.

Por último el tercer trasvase, se encuentra en la cuenca del río Portoviejo, transporta agua por gravedad (túnel) desde el embalse Poza Honda hasta el río Mancha Grande (ubicado en la cabecera de la subcuenca del río Chico).

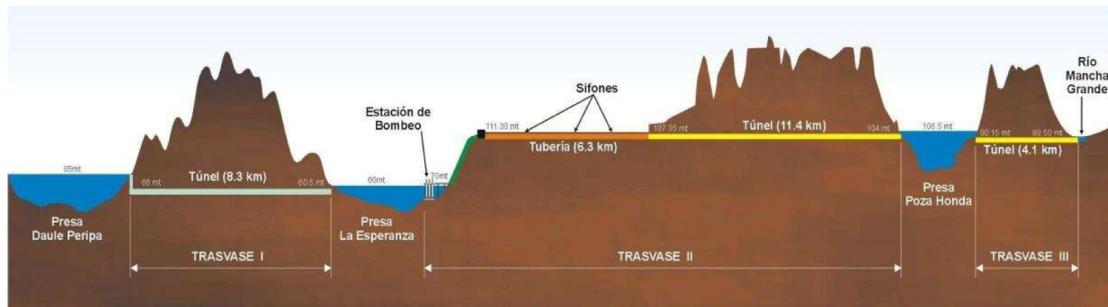


Figura 9: Sistemas de trasvases de la DHM. (Tomado de memorias del Gobierno Provincial de Manabí - Descripción de sistemas de riego de la provincia de Manabí).

En la actualidad se está construyendo un nuevo embalse en la cuenca del río Chone específicamente en la cabecera de la subcuenca del río Grande. Este embalse forma parte de la ejecución del Proyecto Multipropósito Chone, mismo que tiene como objetivo evitar inundaciones en la parte media y baja de la cuenca, mejorando la capacidad de drenaje del río Chone. Además el proyecto incluye la construcción de una planta potabilizadora que permitirá el abastecimiento de agua para consumo humano e industrial para 170.000 habitantes de la cuenca y agua para el riego de 2200 ha aproximadamente; en los próximos 20 años.

Todas estas infraestructuras, construidas para el manejo de los recursos hídricos superficiales, son parte de las directrices registradas en el Plan integral de desarrollo de los recursos hídricos de la provincia de Manabí (PHIMA).

Los recursos subterráneos en la DHM no han sido cuantificados, sin embargo se han explotado durante muchos años. En la última década el uso del agua subterránea se ha incrementado (sobre todo en zonas donde la formación geológica superficial es originada de depósitos aluviales) debido a continuos periodos secos. Se tiene acceso al recurso mediante pozos profundos o pozos

someros artesanales, el uso del agua es para satisfacer tanto la demanda urbana como la agrícola. Los recursos subterráneos de la demarcación no son controlados institucionalmente.

2.4. Demandas

La población de la DHM, se abastece del agua tratada en las plantas potabilizadoras o de las captaciones en zonas de cabeceras.

En el centro de la demarcación, donde se concentra la mayoría de las ciudades de la provincia de Manabí, existen 5 plantas potabilizadoras que abastecen a toda esta zona. Estas 5 plantas se distribuyen de la siguiente manera: 4 en la cuenca del río Portoviejo que abastecen a 7 cantones con una demanda total de 77,3 hm³/año y 1 en la subcuenca del río Carrizal (ubicada en la cuenca del río Chone) que abastece a 5 cantones de poblaciones medianas con una demanda de 20 hm³/año .

Tipo	Cuenca	Código	Planta potabilizadora	Usuarios	Hectáreas	Demanda (hm)
Urbana	río Chone	D.U. 1.01	La Estancilla	304400	----	20
	río Portoviejo	D.U. 2.01	Guarumo	112600	----	7,4
		D.U. 2.02	Caza Lagarto	111000	----	7,3
		D.U. 2.03	Cuatro Esquinas	345000	----	31
		D.U. 2.04	El Ceibal	350000	----	31,6
Agrícola	río Chone	D.A. 1.01	----	2000	13268	240
	río Portoviejo	D.A. 2.01	----	920	1000	14,2
		D.A. 2.02	----	1825	2850	40,5
		D.A. 2.03	----	3935	3350	47,6

Tabla 2: Principales demandas urbanas y agrícolas en la DHM. (Elaboración propia).

Para satisfacer las demandas agrícolas, se construyó el sistema de riego “Poza Honda - río Chico”. Este riega la zona media y baja de la cuenca del río Portoviejo mediante canales (abiertos) de hormigón, primarios y secundarios. Para alimentar estos canales se construyeron mini presas derivadoras, de las cuales unas han colapsado.

En la cuenca del río Chone, en el año 2005 se empezó con uno de los sistemas de riego más completos de la DHM, el “Carrizal - Chone”. Es un sistema presurizado que se divide en dos etapas. La primera etapa permite dotar de agua a 7250 ha, mientras que la segunda abastece a 6018 ha. Es decir el sistema fue construido para regar 13268 ha. En los actuales momentos el sistema solo opera la primera etapa.

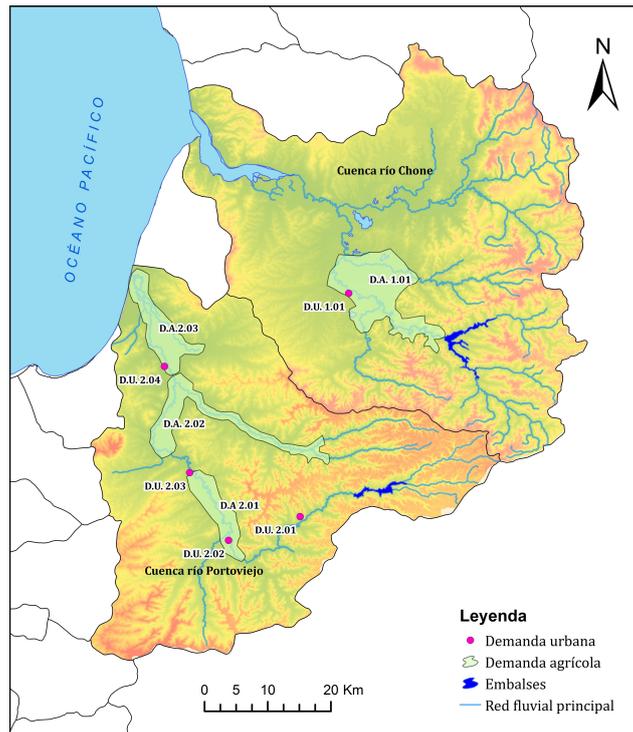


Figura 10: Localización de las principales demandas urbanas y agrícolas en la DHM. (Elaboración propia).

2.5. Estaciones de registros climáticos

En Ecuador, la institución encargada de monitorear el clima es el Instituto Nacional de Meteorología e Hidrología (INAMHI), esta institución recoge el registro diario y mensual de todas las estaciones climáticas y pluviométricas del país. En la provincia de Manabí existen 88 estaciones, de las cuales 68 están en la DHM.

De estas 68 estaciones, 27 son climatológicas convencionales (registran temperatura, precipitación, velocidad del viento, etc.) y las 41 restantes son pluviométricas.

3. ESTADO DEL ARTE

3.1. Conceptualización de la Sequía

Las sequías ocupan el primer lugar entre todos los peligros naturales (*Obasi 1994, Hewitt 1997*) y (*Wilhite 2000*) cuando se mide en términos de número de personas afectadas, alcanzando así el mayor impacto negativo del siglo XX (*Bruce 1994, Obasi 1994*).

En los últimos años, se han observado sequías intensas a gran escala, que afectan a grandes zonas de Europa, África, Asia, Australia, América del Sur, América Central y América del Norte (*Le Comte 1994*) y (*Le Comte 1995*). El impacto económico y social ha dado lugar a una creciente atención por la sequía, discutiéndose en la actualidad en los distintos continentes del mundo.

Tanto las sequías superficiales como las subterráneas, pueden conllevar a la disminución del abastecimiento de agua, deterioro de su calidad, perturbación de los hábitats ribereños, reducción de la productividad y baja calidad de las cosechas, disminución de la generación de energía, y la suspensión de las actividades recreativas; así como la afectación de un gran número de actividades socioeconómicas (*Riebsame, Changnon Jr et al. 1991*).

Las sequías tienen la característica de tener un lento desarrollo temporal y una amplia cobertura espacial, condición que dificulta precisar con exactitud la duración y extensión del fenómeno. Su ocurrencia no provoca el colapso ni la falla destructiva de las infraestructuras; sin embargo, puede condicionar las operaciones de los sistemas de recursos hídricos imponiendo muchas veces condiciones más exigentes que las de diseño con graves consecuencias económicas y sociales (*Fernández 1997*).

El conocimiento del comportamiento de las sequías ha sido un importante aspecto en el planeamiento y manejo de los sistemas de recursos hídricos. Generalmente los embalses cumplen la importante función de suplir los requerimientos de la demanda durante situaciones de sequías (*Shin and Salas 2000*). El único modo de abastecer y dar satisfacción a las demandas en una situación de desfase entre la necesidad y la disponibilidad del recurso, es acumulando agua en épocas de abundancia y sobrantes para transferirla en las

épocas de mayor consumo y baja disponibilidad. Ello se logra con la regulación (proceso de acumulación y transferencia) de los embalses.

Los embalses tienen entonces como objeto y utilidad regular el recurso hídrico permitiendo; transferir agua en épocas de mayor demanda, aprovechar un mayor porcentaje de la oferta natural anual y al mismo tiempo brindar una mayor garantía de servicio (*Alder 2006*).

La sequía no tiene una definición universal. Las diferencias en las variables hidrometeorológicas y los factores socioeconómicos, así como la naturaleza estocástica de la demanda de agua en las diferentes regiones del mundo se han convertido en un obstáculo para tener una definición precisa (*Mishra and Singh 2010*). Sin embargo existen algunas definiciones de sequía, de las cuales son comúnmente utilizadas las establecidas por: (I) La Organización Meteorológica Mundial (*WMO 1986*), que define a la “sequía como una deficiencia en la precipitación sostenida y extendida”. (II) La Convención de las Naciones Unidas de Lucha contra la Sequía y la Desertificación (*United Nations Secretariat General 1994*), la define como “el fenómeno que se produce naturalmente cuando las lluvias han sido considerablemente inferiores a los niveles normales registrados, causando un agudo desequilibrio hídrico que perjudica los sistemas de producción de recursos de tierras”. (III) La Organización para la Agricultura y la Alimentación de las Naciones Unidas (*FAO 1983*), define un peligro de sequía como “el porcentaje de años, cuando los cultivos se pierden por la falta de humedad”. (IV) La enciclopedia del clima y el tiempo (*Schneider 1996*), define una sequía como “un período prolongado, una temporada, un año o varios años deficientes de las precipitaciones respecto a la media estadística de varios años para una región”. (V) (*Gumbel 1963*), define una “sequía como el valor anual más pequeño de los caudales diarios”. (VI) (*Palmer 1965*), describió una “sequía como una desviación significativa de las condiciones hidrológicas normales de un área”. (VII) (*Linsely Jr., Kohler et al. 1959*) define “la sequía como un período de tiempo prolongado sin lluvias importantes”.

(*Mishra and Singh 2010*) mencionan que las sequías se clasifican generalmente en las cuatro categorías establecidas por Wilhite y Glantz 1985 y

la Sociedad Meteorológica Americana (American Meteorological Society, AMS 2004). Esta son sequía meteorológica, agrícola, hidrológica y socioeconómica. Existen clasificaciones más simples, como la de (*SUDENE 1999*), que prescinde del tipo meteorológico y divide las sequías en hidrológicas agrícolas y efectivas (estas últimas equivalentes a socioeconómicas), y más detalladas, como la de (*Subrahmanyam 1967*), que distingue hasta seis tipos de sequía (meteorológica, climática, atmosférica, agrícola, hidrológica y de gestión hídrica). Sin embargo, la clasificación actualmente considerada es la propuesta por Wilhite y Glantz 1985, y la AMS 2004.

3.1.1. Tipos de sequía

Sequía meteorológica

Se define como una falta de precipitación sobre una región durante un tiempo determinado (*Mishra and Singh 2010*). Ante la dificultad de establecer una duración y magnitud del déficit pluviométrico válidas para diferentes áreas geográficas, algunas definiciones de sequía optan por no especificar umbrales fijos (*Valiente 2001*). Por ejemplo, (*Palmer 1965*) define la sequía meteorológica como el intervalo de tiempo, con una duración del orden de meses o años, durante el cual el aporte de humedad en un determinado lugar disminuye progresivamente por debajo de lo climatológicamente esperado o del aporte de humedad climatológicamente apropiado. (*Russell, Arey et al. 1970*) definen la sequía meteorológica, como la falta prolongada de precipitación, inferior a la media.

Al variar las definiciones de sequía meteorológica en función de las características climáticas de una región en particular, resulta imposible extrapolar una definición de una región a otra, salvo que ambas muestren pautas climáticas análogas:

- INDIA: situación en la que la precipitación estacional anual es deficiente en, al menos, dos veces la desviación típica (*Ramdas 1960*).
- INDONESIA (BALI): período de seis días sin lluvias (*Hudson and Hazen 1964*).

- LIBIA: precipitación anual inferior a 180 mm (*Hudson and Hazen 1964*)
- INDIA: la precipitación es inferior al 80% de los niveles normales (*Dhar et al., 1979*).
- UNIÓN DE REPÚBLICAS SOCIALISTAS SOVIÉTICAS: período de 10 días con una lluvia total que no excede 5 mm (*Krishnan 1979*).
- NORDESTE DE BRASIL: precipitación mensual durante la temporada lluviosa inferiores a 100 mm o al 80% de la media a lo largo de 90 días, durante los cuales se producen intervalos superiores a 10 días con valores inferiores a 10 mm (*SUDENE 1981*).
- GRAN BRETAÑA: período de al menos quince días consecutivos con precipitación diaria inferior a 0.25 mm (*Goudie 1985*).
- ESPAÑA: en las cuencas hidrográficas españolas pueden considerarse años secos aquellos cuya precipitación experimenta la siguiente reducción respecto a la media anual: Cantábrico, Duero y Ebro, 15-25%; Guadalquivir 20-25%; Guadiana/Tajo, 30%; Levante y Sureste, 40-50% (*Olcina 1994*).
- VENEZUELA: un mes con sequía es aquel cuya precipitación acumulada mensual sea inferior a 25 mm, lo cual corresponde al período mensual de lluvia que separa los climas áridos de los semiáridos en la clasificación de Köppen (*Carrillo 1999*).

Algunas definiciones, incluyen además la precipitación además de la evapotranspiración. Así, (Rind, Goldberg et al. 1990) definen la sequía meteorológica como la condición resultante de un exceso de demanda atmosférica de humedad respecto a su aporte, es decir, $(ETP > P)$.

Sequía agrícola

Se refiere a un período con la disminución de la humedad del suelo y la consiguiente pérdida de cosechas sin ninguna referencia a los recursos hídricos superficiales (*Mishra and Singh 2010*). Dada la diferencia en las necesidades hídricas para cada cultivo, no es posible establecer umbrales de sequía agrícola válidos, ni siquiera para un área geográfica específica (*Valiente 2001*). Aun así, (*Kulik 1962*) se arriesga a definir la sequía agrícola como el

periodo durante el cual sólo hay 19 mm de agua disponible en los primeros 20 cm de suelo. Si los niveles de humedad en el subsuelo son suficientes para proporcionar agua a un determinado tipo de cultivo durante el periodo que dure la sequía meteorológica, no llegará a producirse una sequía agrícola (*Valiente 2001*).

Sequía hidrológica

Hace referencia a un período con insuficiencia de los recursos hídricos superficiales y subterráneos para los usos de agua establecidos de un sistema de gestión de recursos hídricos dado (*Mishra and Singh 2010*).

La sequía hidrológica puede demorarse durante meses desde el inicio de la escasez pluviométrica o, si las lluvias retornan en poco tiempo, no llegar a manifestarse. Por tanto, la secuencia temporal es: sequía meteorológica, seguida de la sequía agrícola y, por último la sequía hidrológica (*Valiente 2001*).

Sequía operativa

Sequía operativa es un término utilizado en España, la clasificación de *Wilhite and Glantz 1985* no la recoge. (*Estrela 2006*) Indica que se considera sequía operativa cuando se producen periodos en estado de fallos (no satisfacción de un uso) anómalos en un sistema de explotación de recursos hídricos desarrollado. Las causas pueden ser; la escasez de recursos (sequía hidrológica), el exceso de demanda o la gestión o el diseño no adecuado del sistema de explotación de recursos y de sus reglas de explotación.

Sequía socioeconómica

Se asocia con el fracaso de los sistemas de recursos hídricos para satisfacer las demandas de agua, asociando así las sequías con el suministro y la demanda de un bien económico (agua) (*AMS 2004*). Para hablar de sequía socioeconómica sólo es necesario que algún sector económico se vea afectado por la escasez hídrica.

En términos generales, la sequía socioeconómica sucede a la agrícola pero en regiones menos desarrolladas, donde este sector tiene un mayor peso en la economía, y su incidencia es más directa e inmediata que en regiones

desarrolladas, la sequía agrícola constituye en sí misma el inicio de la sequía socioeconómica (Valiente 2001).

Tomando en consideración los tipos de sequía meteorológica, agrícola, hidrológica y operativa; una posible definición de la sequía sería la siguiente: Es un fenómeno hidrológico extremo que puede definirse como una disminución temporal significativa de los recursos hídricos durante un periodo suficientemente prolongado que afecta a un área extensa con consecuencias socioeconómicas adversas (Estrela 2006).

Las relaciones entre los tipos de sequías se muestran en la siguiente figura.

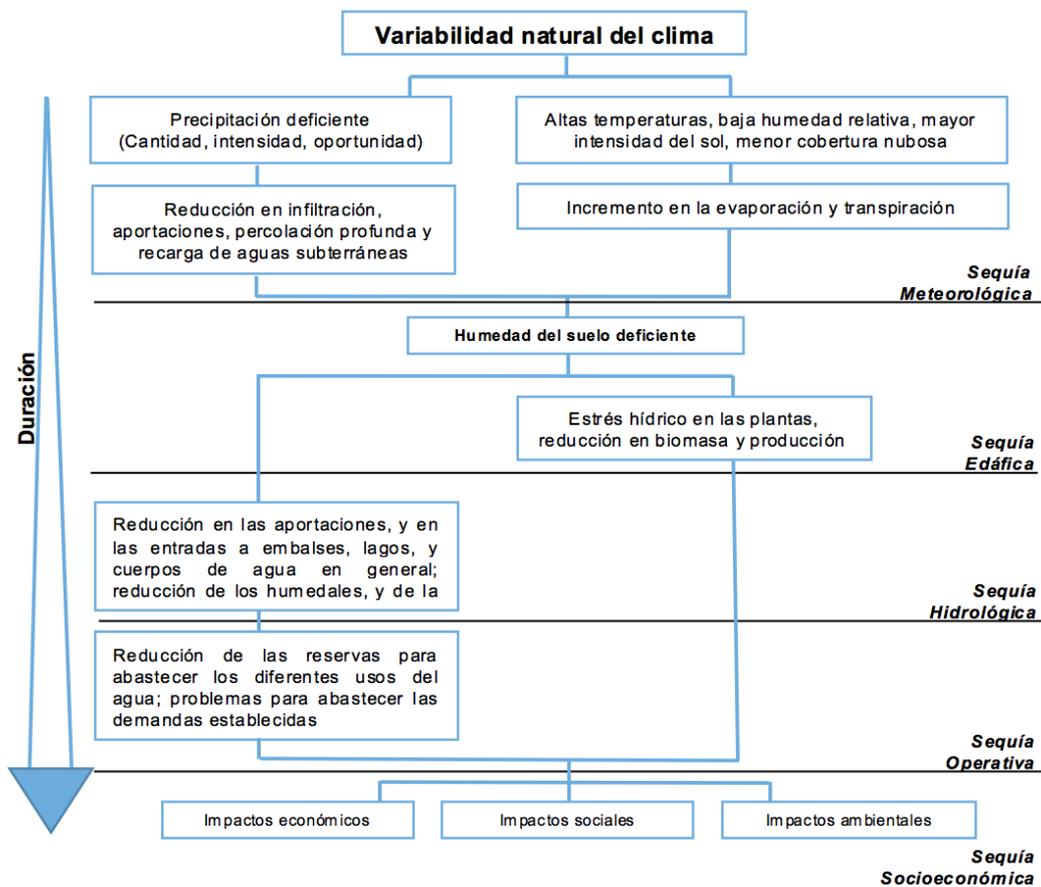


Figura 12: Relación entre tipos de sequías y duración de eventos. (Tomado de Villalobos 2006)

La Guía para la elaboración de una estrategia de lucha contra los daños de las sequías de la Comisión Internacional de Riegos y Drenajes, señala que a pesar de la elevada incertidumbre actual en la evaluación de los factores causantes de la sequía y la dificultad de predecir los eventos de sequía, existen sin

embargo medios y métodos para luchar contra los daños que esta produce, entre los que cabe mencionar: el establecimiento de distintos tipos de indicadores que detecten niveles de sequía; los métodos de prevención, orientados al suministro, a la demanda o a la minimización de los impactos; los instrumentos de reducción de daños, como la mejora de los suelos o los cambios en los cultivos buscando variedades más tolerantes a las sequías; la conciencia del riesgo, lo que conlleva a la determinación de niveles tolerables y grados de pérdidas; la organización y coordinación de los agentes implicados; o la cooperación internacional (ICID 1998).

3.2. Índices de Sequías

Se considera un índice de sequía como una variable capaz de cuantificar la sequía en diferentes escalas de tiempo, con el fin de evaluar su efecto y definir sus diferentes parámetros (intensidad, duración, gravedad y extensión espacial) (Mishra and Singh 2010). Para el análisis de la sequía la escala temporal más comúnmente utilizada es la anual seguida por la mensual. La escala mensual parece ser más adecuada para el seguimiento de los efectos de una sequía en situaciones relacionadas con la agricultura, el abastecimiento de agua y la extracción de agua del suelo (Panu and Sharma 2002).

En las últimas décadas, varios índices se han desarrollado (Mishra and Singh 2010) para cuantificar las sequías, entre ellos; el Índice de Severidad de Sequía de Palmer (Palmer Drought Severity Index, PDSI) (Palmer 1965); el Índice de Anomalía de Precipitación (Rainfall Anomaly Index, RAI) (Van Rooy 1965); Deciles (Gibbs and Maher 1967); el Índice de Humedad del Cultivo (Crop Moisture Index, CMI) (Palmer 1968); el Índice de sequía Keetch - Byram (Keetch - Byram Drought Index, KBDI) (Keetch and Byram 1968); el Índice de Sequía Bhalme y Mooly (Bhalme and Mooly Drought Index, BMDI) (Bhalme and Mooly 1980); el Índice de Suministro de Agua Superficial (Surface Water Supply Index, SWSI) (Shafer and Dezman 1982); el Índice Nacional de Precipitaciones (National Rainfall Index, NRI) (Gommes and Petrassi 1994); el Índice de Precipitación Estandarizado (Standardized Precipitation Index, SPI) (McKee, Doesken et al. 1993) y el Índice de Reclamación de Sequía

(Reclamation Drought Index, RDI) (*Weghorst 1996*). España por su parte ha adoptado un Índice para monitorear la sequía operativa de los sistemas hidrológicos llamado Índice de Estado (I.e.) (*CHJ 2007*). Existen también el Índice de Salud de la Vegetación (Vegetation Health Index, VHI) y el Índice de Vegetación Diferencial Normalizado (Normalized Difference Vegetation Index, NDVI) (*Rouse Jr, Haas et al. 1973*); que son utilizados como dato indirecto para monitorear la sequía. (*NOAA-STAR*).

3.2.1. Índice de Anomalía de Precipitación (RAI)

Fue creado por (*Van Rooy 1965*), permite evaluar la sequía meteorológica comparando la precipitación de un lugar y momento determinado con la media de los diez valores extremos de anomalías positivas y negativas de precipitación. Se calcula a escala semanal, mensual o anual. La elección de la escala se realiza sobre la base de la distribución de la precipitación.

3.2.2. Deciles

(*Gibbs and Maher 1967*) propusieron la utilización del concepto “decil” para detectar la sequía meteorológica. Consiste en discretizar la probabilidad de ocurrencia en décimos. De esta manera, el primer decil es la cantidad de precipitación no excedida por el 10% de los registros históricos, el segundo decil es el que corresponde al 20%, el quinto a la mediana (es decir, la lluvia no superada por el 50% de los datos), y el décimo coincide con el valor máximo histórico.

3.2.3. Índice de Humedad del cultivo (CMI)

El índice fue creado por (*Palmer 1968*), monitorea los cambios de humedad del suelo a corto plazo. El CMI responde rápidamente a cambios de las condiciones de humedad y es ponderado para cada localización y época del año permitiendo realizar el monitoreo espacio temporal de la sequía agrícola. Se basa en datos semanales de temperatura media y precipitación total y el valor del CMI de la semana anterior.

3.2.4. Índice de sequía Keetch - Byram (KBDI)

El KBDI, creado por (*Keetch and Byram 1968*) para el Servicio Forestal de Agricultura de los Estados Unidos, se diseñó sobre la base de modelos matemáticos para predecir la probabilidad de incendios forestales basado en la humedad del suelo y otras condiciones relacionadas con la sequía. El KBDI es una medida de la sequía meteorológica; que refleja el aumento o la pérdida del agua en el suelo. El cálculo del índice incluye las variables; temperatura máxima diaria, precipitación diaria antecedente y precipitación anual.

3.2.5. Índice de Vegetación Diferencial Normalizado (NDVI)

El NDVI fue utilizado por primera vez por (*Rouse Jr, Haas et al. 1973*) del Centro de Teledetección de la Universidad de Texas A & M University. Es un indicador numérico que utiliza las bandas visibles e infrarrojo cercano del espectro electromagnético, y se adopta para analizar las mediciones de teledetección y evaluar si el objetivo siendo observado contiene vegetación verde viva o no. Estima la cantidad, calidad y desarrollo de la vegetación. Se construye a partir de imágenes satelitales.

3.2.6. Porcentaje de Precipitación Normal (PPN)

Se calcula dividiendo la precipitación total registrada en un periodo determinado (mes, trimestre, semestre, año, etc.) para la precipitación media (estimada de una serie de al menos 30 años de información) del mismo periodo de referencia, expresando el resultado en porcentaje.

(*Bhalme and Mooley 1980*) rebautizaron el método con las siglas BMDI (Bhalme and Mooley Drought Index), pese a ser un procedimiento estadístico utilizado con antelación. Considerándolo un índice de sequía numérica objetiva basada en lluvias monzónicas mensuales y su duración, para evaluar la intensidad de la sequía meteorológica.

3.2.7. Índice de Suministro de Agua Superficial (SWSI)

Es un índice de sequía hidrológica desarrollado en Colorado, por (*Shafer and Dezman 1982*) como complemento del PDSI. El índice se obtiene a partir de distribuciones de probabilidad acumulada de datos del curso de la nieve, las

precipitaciones, los embalses y los caudales. Cada una de las variables constituyentes del índice se pondera en proporción a su probable impacto en los recursos hídricos de superficie total de la cuenca. Al combinarlo con el Índice de Severidad de Sequía de Palmer (PDSI), actúa como un mecanismo de disparo para activar el plan de respuesta del estado de la sequía, así como un criterio para determinar cuándo una sequía ha terminado con eficacia.

3.2.8. Índice Nacional de Precipitaciones (NRI)

El índice fue creado por (*Gommes and Petrassi 1994*), y aplicado en África. Se calcula por país, tomando la precipitación media anual del territorio según el peso de las medias a largo plazo de cada estación. El NRI muestra estrecha relación con la producción agrícola, puesto que al recaer el peso en la precipitación anual, las estaciones en áreas más húmedas de un país tienen mayor influencia sobre el índice que las estaciones de áreas secas. No permite una escala espacial de detalle (los resultados surgen en el ámbito nacional). Solo es útil para detectar las sequías agrícolas.

3.2.9. Índice de Salud de la Vegetación (VHI)

El Índice de Salud de la vegetación, es un indicador "*proxy*" de las condiciones de la salud general de la vegetación (*Kogan 1995*); es una estimación combinada del estado de contenido térmico y de humedad de la vegetación. Se deriva de la unión del índice de Condición de la vegetación (Vegetation Condition Index, VCI) y el índice de Condición de la temperatura (Temperature Condition Index, TCI). Al igual que el NDVI, el VHI se construye a partir de las imágenes satelitales.

3.2.10. Índice de Reclamación de Sequía (RDI)

El índice fue desarrollado por (*Weghorst 1996*), se calcula a nivel de cuenca hidrográfica. Es un indicador de la sequía hidrológica. Permite conocer el equilibrio entre la oferta y la demanda hídrica. La construcción de índice incluye la temperatura, precipitación, espesor de nieve en el suelo, caudal y reservas almacenadas.

Este apartado no incluyó la definición del SPI, I.e y PDSI; porque se sustentan con mayor detalle en el siguiente apartado por ser estos los índices a aplicar.

3.3. Índices Aplicados

Los índices utilizados con mayor frecuencia son el SPI, el PDSI, el CMI y el SWSI (*Mishra and Singh 2010*). A continuación se describen los índices utilizados en el presente estudio (SPI, I.e., PDSI).

3.3.1. Índice de Precipitación Estandarizado (SPI)

La comprensión de que un déficit de precipitación tiene diferentes impactos en las aguas subterráneas, almacenamiento de los embalses, la humedad del suelo, la capa de nieve, y el caudal; llevó a (*McKee, Doesken et al. 1993*) a desarrollar el Índice de Precipitación Estandarizado (SPI).

El cálculo del Índice de Precipitación Estandarizado (SPI) para cualquier lugar se basa en el registro de precipitación a largo plazo durante un período deseado. Este registro a largo plazo se ajusta a una distribución de probabilidad, que luego se transforma a una distribución normal, de modo que la media del SPI para la ubicación y el tiempo deseado es cero (*McKee, Doesken et al. 1993*) y (*Edwards and McKee 1997*).

El SPI se diseñó para cuantificar el déficit de precipitación a múltiples escalas de tiempo. Estas escalas reflejan el impacto de la sequía sobre la disponibilidad de los diferentes recursos hídricos. Las condiciones de humedad del suelo responden a las anomalías de precipitación en una escala de tiempo relativamente corto (meses e incluso semanas), mientras que las aguas subterráneas, las corrientes de agua y el almacenamiento de los embalses reflejan las anomalías de precipitación a largo plazo (años). Por estas razones, (*McKee, Doesken et al. 1993*) originalmente han calculado el SPI para 3, 6, 12, 24 y 48 meses.

Se recomienda usar el SPI para un periodo continuo de al menos 30 años. Las escalas de tiempo son arbitrarias pero representan una típica serie de déficit de precipitación que afectan a diferentes fuentes de agua; por ejemplo, para anomalías de lluvia relacionados con la variabilidad intraestacional se recomienda usar SPI-3 o SPI-6, mientras que para sequías persistentes se puede usar SPI-24 o SPI-48 (*Méndez and Magaña 2010*).

Para calcular el SPI se procede de la siguiente manera:

- Se generan series para la escala de tiempo, para las que se desee calcular el SPI. Por ejemplo: cálculo del SPI para una escala de tres meses (*Ver Tabla 3*)
- A la serie generada en el primer paso se le ajusta una función de distribución.

Precipitación mensual	Escala de tres meses	Escala de seis meses
X_1	---	-----
X_2	---	-----
X_3	X_1	-----
X_4	X_2	-----
X_5	X_3	-----
X_6	X_4	$X_1 + X$
X_7	X_5	$X_2 + X$
...
X_n	X_{n-2}	$X_{n-5} + X$

Tabla 3: Cálculo de la serie para determinar el SPI.

- Dado un cierto nivel de precipitación acumulada, para la escala de tiempo seleccionada, se calcula la probabilidad de excedencia, en base a la función de distribución elegida.
- Para el complemento de la probabilidad, calculada en el punto anterior, se calcula el valor de la variable normalizada, como la inversa de la función de distribución normal acumulada. El valor resultante corresponde al SPI.

(*McKee, Doesken et al. 1993*) hacen uso del sistema de clasificación mostrado en la *Tabla 4*, para la caracterización del estado de sequía. También definen los criterios para un "evento de sequía" para cualquier escala de tiempo.

Un episodio de sequía tiene lugar siempre que el SPI sea continuamente negativo y alcance una intensidad de -1.0, o inferior. El episodio finaliza cuando el SPI alcanza valores positivos. Cada episodio de sequía, por lo tanto, tiene una duración definida por su principio y fin, y una intensidad por cada mes que el evento continúe.

Valor SPI	Clases de Sequía
>2.00	Extremadamente Húmedo
1.50 a 1.99	Muy Húmedo
1.00 a 1.49	Moderadamente Húmedo
-0.99 a 0.99	Normal
-1.00 a -1.49	Sequía Moderada
-1.50 a -1.99	Sequía Severa
<-2.00	Sequía Extrema

Tabla 4: Clases de Sequía definidas por McKee, Doesken et al. 1993.

(Agnew 2000) cuestionó los valores asignados al SPI para las clases de la sequía y propuso umbrales alternativos, más racionales. El efecto del uso de diferentes clases de sequía se investigó mediante precipitaciones anuales de la región de Sahel de África Occidental.

Valor SPI	Clases de Sequía
< -1.65	Sequía Extrema
< -1.28	Sequía Severa
< -0.84	Sequía Moderada
< -0.50	Sin Sequía
< 0.00	Sin Sequía

Tabla 5: Clases de Sequía definidas por Agnew 2000.

3.3.2. Índice de Severidad de Sequía de Palmer (PDSI)

(Palmer 1965) desarrolló un índice para medir el estado del suministro de humedad. Es calculado a partir de un modelo de balance hídrico, teniendo en cuenta algo más que el déficit de precipitación en lugares específicos. Este fue el primer esfuerzo integral para evaluar el estado de humedad total de una región.

Palmer consideró un modelo de dos capas para calcular la humedad del suelo y asumió simplificaciones referidas a la capacidad de campo y la transferencia de humedad entre capas. Consideró que la capa superior tiene una capacidad de campo de 1 pulgada, humedad que no es transferida a la capa inferior hasta que la capa superior esté saturada. Toda la precipitación que ocurre durante un mes se transforma durante el mismo mes en evapotranspiración, en la demanda de humedad del suelo o es perdida mediante flujo superficial. Palmer

definió Valores Climatológicamente Apropriados para las Condiciones Existentes (Climatologically Appropriate for Existing Conditions, CAFEC) para normalizar sus cálculos de tal modo que dimensionalmente el índice pueda ser comparado a lo largo del tiempo y del espacio. En el balance hidrológico se estima la evapotranspiración potencial, la recarga, el escurrimiento y los coeficientes para cada parámetro, que son obtenidos a partir de un cociente entre los valores reales y los potenciales.

Palmer además de definir el PDSI, definió el Índice hidrológico de sequía de Palmer (Palmer Hydrological Drought Index, PHDI) y el Índice Z.

El PHDI fue desarrollado para cuantificar la sequía hidrológica a largo plazo acumulativo (niveles de los embalses, niveles de agua subterránea, etc). El PHDI responde más lentamente a los cambios de condiciones que el PDSI (NCDC 2013).

El Índice Z, refleja la anomalía de la humedad para un mes determinado con respecto al promedio histórico. Se utiliza satisfactoriamente para medir la intensidad de la sequía edáfica, puesto que responde rápidamente a las anomalías negativas de la humedad de corta duración (Valiente 2001).

(Alley 1984) Identifica tres características positivas del Índice de Palmer que contribuyen a su popularidad: (1) Proporciona a los tomadores de decisiones una medida de la anomalía de tiempo reciente de una región; (2) Proporciona una oportunidad para colocar las condiciones actuales en una perspectiva histórica; y (3) Proporciona representaciones temporales y espaciales de las sequías históricas. Varios estados de los Estados Unidos utilizan el Índice de Palmer como parte de los sistemas de seguimiento de la sequía.

En la *Tabla 6*, se establece el sistema de clasificación para definir intensidades de sequía resultantes del PDSI. Valores positivos del índice indican condiciones de humedad, mientras que valores negativos indican condiciones de sequía.

Valor PDSI	Clases de Sequía
4.0 o más	Extremadamente Húmedo
3.0 a 3.99	Muy Húmedo
2.0 a 2.99	Moderadamente Húmedo
1.0 a 1.99	Ligeramente Húmedo
0.5 a 0.99	Húmedo Incipiente
0.49 a -0.49	Normal
-0.5 a -0.99	Sequía Incipiente
-1.0 a -1.99	Sequía Reducida
-2.0 a -2.99	Sequía Moderada
-3.0 a -3.99	Sequía Severa
-4.0 o menos	Sequía Extrema

Tabla 6: Clases de Sequía definidas por Palmer 1965.

3.3.2.1. Auto-calibración del Índice de Severidad de Sequía de Palmer (SC-PDSI)

El PDSI se ha utilizado durante más de 30 años para cuantificar las condiciones de sequía a largo plazo para un lugar y tiempo determinado. Sin embargo, una crítica común del PDSI es que el comportamiento del índice en varios lugares es inconsistente, es decir sus valores no son comparables entre diferentes regiones climatológicas (Wells, Goddard et al. 2004).

Palmer calculó constantes empíricas para la característica climática y los factores de duración usados en el cálculo del PDSI, que afectan directamente a la comparabilidad espacial del índice, mediante el promedio de los valores de sólo unos pocos lugares que representan un pequeño número de climas. Estos valores medios de la característica climática y los factores de duración se han convertido en una parte fija de los cálculos del PDSI, independientemente del clima en el que se utiliza. Los avances en la tecnología informática hacen posible mejorar el rendimiento del PDSI. Por ello se presentó y evaluó, una auto-calibración del Índice de Severidad de Sequía de Palmer (Self-Calibrating Palmer Drought Severity Index, SC-PDSI) el cual calibra automáticamente el comportamiento del índice en cualquier ubicación mediante la sustitución de constantes empíricas en el cálculo del índice con valores calculados dinámicamente. Esto se logra mediante la ponderación correcta de la característica climática, que afecta a la gama de valores PDSI, y el cálculo

automático de los factores de duración, que ajusta la sensibilidad del índice. Estas dos modificaciones hacen posible que el índice se comporte de una forma consistente y predecible, así mismo permiten representar de manera más realista los climas de diversos lugares.

La evaluación de la SC-PDSI en 761 sitios dentro de Nebraska, Kansas, Colorado, Wyoming, Montana, Dakota del Norte y Dakota del Sur, así como en las 344 divisiones climáticas de los Estados Unidos muestra que es más comparable espacialmente que el PDSI, y los informes de extremas condiciones húmedas y secas, con frecuencias que se esperaría para condiciones raras (*Wells, Goddard et al. 2004*).

3.3.3. Índice de estado (I_e)

Con el objetivo de realizar un seguimiento del problema de la sequía, se han ideado los "índices de estado" (*CHJ 2007*).

El "índice de estado" se basa en un análisis estadístico de dos datos o variables: existencias y aportaciones para el sistema concreto que queramos analizar.

Definición del índice de estado

Para la definición del I_e , se ha tenido en cuenta los siguientes criterios:

- La media aritmética es uno de los estadísticos más robustos, a la vez que más sencillo; por lo que una comparación del dato del indicador con la media de la serie histórica considerada, se ajustará más convenientemente, en principio, a la situación real de la zona de sequía seleccionada, si bien, debe tenerse en cuenta también los valores máximos y mínimos históricos.
- La necesidad de homogeneizar los indicadores en un valor numérico adimensional capaz de cuantificar la situación actual respecto de la histórica, y posibilitar una comparación cuantitativa entre los distintos indicadores seleccionados. Por ello se ha adoptado una fórmula en la que se define el Índice de Estado (I_e) cuyos valores fluctúan en un rango comprendido entre 0 (correspondiente al mínimo valor histórico) y 1 (correspondiente al máximo valor histórico).

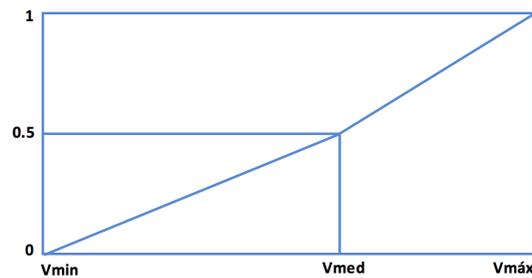


Figura 13: Definición del Índice de Estado. (Tomado CHJ, 2007)

Como se ha mencionado anteriormente, el rango de valores del Índice de Estado, es de 0 a 1; a efectos de diagnosticar la situación de sequía operacional, se establecen cuatro escenarios.

- $I_e \geq 0,50$ Escenario de normalidad (verde)
- $0,50 > I_e \geq 0,30$ Escenario de prealerta (amarillo)
- $0,30 > I_e \geq 0,15$ Escenario de alerta (naranja)
- $0,15 > I_e$ Escenario de emergencia (rojo)

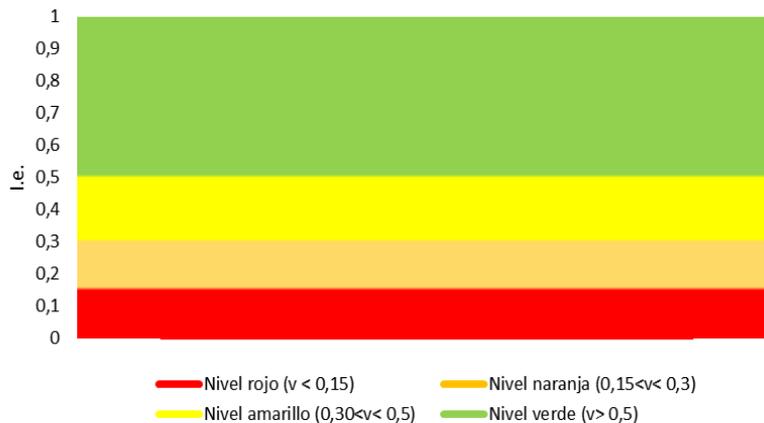


Figura 14: Representación gráfica del Índice de Estado. (Tomado CHJ, 2007).

De manera que:

- La situación o estado de prealerta viene dado cuando el indicador hidrológico está comprendido entre el umbral de prealerta y el umbral de alerta.
- La situación o estado de alerta viene dado cuando el indicador hidrológico está comprendido entre el umbral de alerta y emergencia.
- La situación o estado de emergencia viene dado cuando el indicador está por debajo del umbral de emergencia.

3.4. Aplicación de índices para la evaluación y seguimiento de la Sequía

El desarrollo de los sistemas de indicadores debe considerarse como un elemento esencial en la gestión de los eventos de sequía y en la planificación estratégica de las acciones a llevar a cabo (*Estrela 2006*).

Por ejemplo; en los Estados Unidos, a medida que el siglo XX llegaba a su fin (1999), una nueva herramienta de seguimiento de la sequía fue desarrollado en un esfuerzo de colaboración federal - estatal para consolidar y centralizar las actividades de vigilancia de la sequía. Las agencias dentro de la Administración Nacional Oceánica y atmosférica (NOAA) y el Departamento de la Agricultura de los Estados Unidos (USDA) se asoció con el Centro Nacional para la Mitigación de la Sequía (NDMC) para producir un Monitor de Sequía semanal (DM) producto que incorpora datos climáticos y aporte profesional de todos los niveles (*Svoboda 2000*).

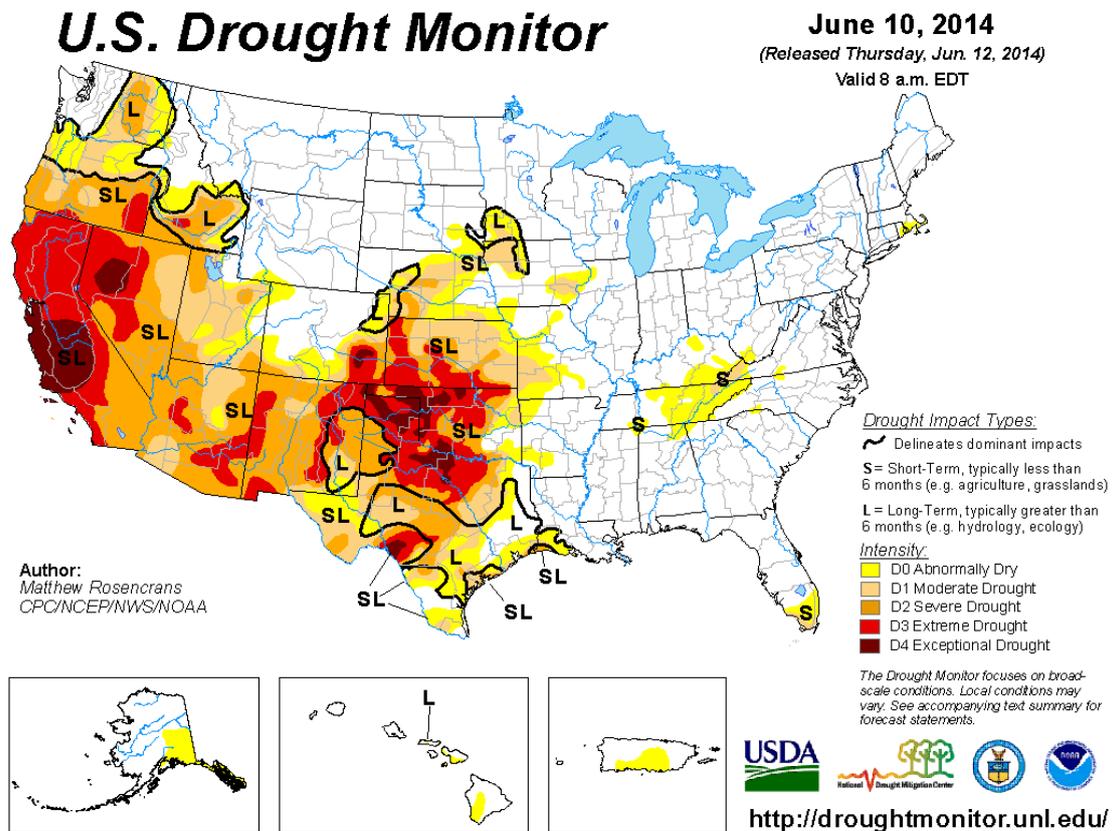


Figura 15: Monitor de Sequía de Estados Unidos (EE.UU). Tomado de U.S Drought Portal.

Considerando que no existe solo una definición de la sequía, los autores del DM se basan en los análisis de varios índices claves e indicadores auxiliares de distintas agencias para crear el mapa final. Entre los indicadores claves se encuentra el PDSI, el Índice de humedad del cultivo (CMI), Percentiles de caudales diarios, Porcentaje de Precipitación Normal (PPN), humedad de la capa superficial del suelo (porcentaje corto y muy corto) generada por el USDA, y un Índice de Salud de la Vegetación (VHI) basado en satélites. En cuanto a los indicadores auxiliares incluyen índices como el SPI, el Índice de suministro de agua superficial (SWSI), Índice de sequía Keetch-Byram (KBDI), las condiciones de la capa de nieve, los niveles de los embalses, los niveles de agua subterránea, entre otros.

La intención del Monitor de Sequía semanal es proporcionar una evaluación general de la situación actual de la sequía en los Estados Unidos, Posesiones del Pacífico y Puerto Rico (Svoboda 2000). El PDSI es utilizado ampliamente por el Departamento de Agricultura de los Estados Unidos para determinar cuándo se debe conceder ayudas de socorro para la sequía; pero el Índice de Palmer se adapta mejor a zonas muy extensas, con topografía uniforme. Los estados del oeste de los Estados Unidos, que tienen un terreno montañoso y, por ello, unos microclimas regionales muy complejos, prefieren complementar el Índice de Palmer con otros indicadores, como es el SWSI, que tiene en cuenta la masa de nieve y otras condiciones únicas.

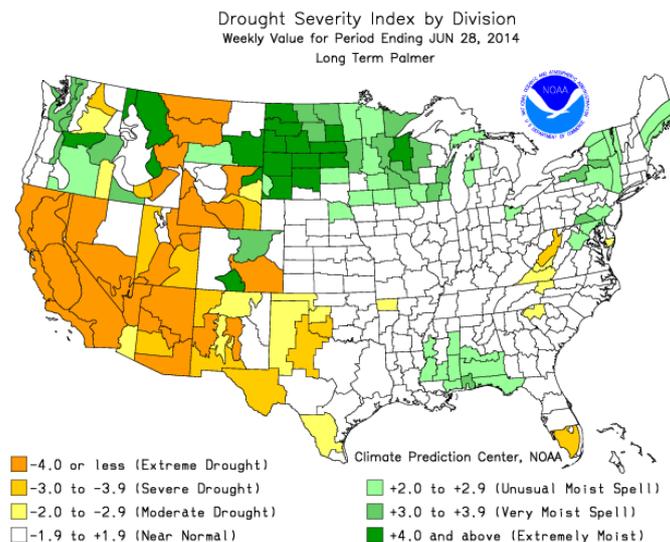


Figura 16: PDSI mensual en Estados Unidos, Junio 2014. Tomado de U.S Drought Portal.

El Centro Nacional para la Mitigación de la Sequía de los Estados Unidos, utiliza el SPI para hacer un seguimiento de las condiciones de humedad. Los rasgos distintivos de este indicador son que reconoce las sequías en fase de preparación, meses antes que el PDSI, y que se calcula en varias escalas de tiempo.

En base al Monitor de Sequía de los Estados Unidos (USDM) se desarrolló (*Lawrimore, Heim Jr et al. 2002*) el Monitor de Sequía mensual de América del Norte (North American Drought Monitor, NADM), para proporcionar una evaluación global e integrada de la sequía en Canadá, México y Estados Unidos. El programa se inició con un taller de tres días a finales de abril de 2002 y es parte de un gran esfuerzo para mejorar el seguimiento de las condiciones climáticas extremas en el continente. Los principales participantes en Canadá y México incluyen; la Agricultura y Agroalimentación de Canadá, el Servicio Meteorológico de Canadá, y el Servicio Meteorológico Nacional de México (SMN).

North American Drought Monitor

May 31, 2014

Released: Tuesday, June 10, 2014

<http://www.ncdc.noaa.gov/nadm.html>

Analysts:
 Canada - Trevor Hadwen*
 Brianna Kelly
 Mexico - Reynaldo Pascual
 Adelina Albanil
 U.S.A. - Richard Tinker
 (* Responsible for collecting analysts' input & assembling the NADM map)

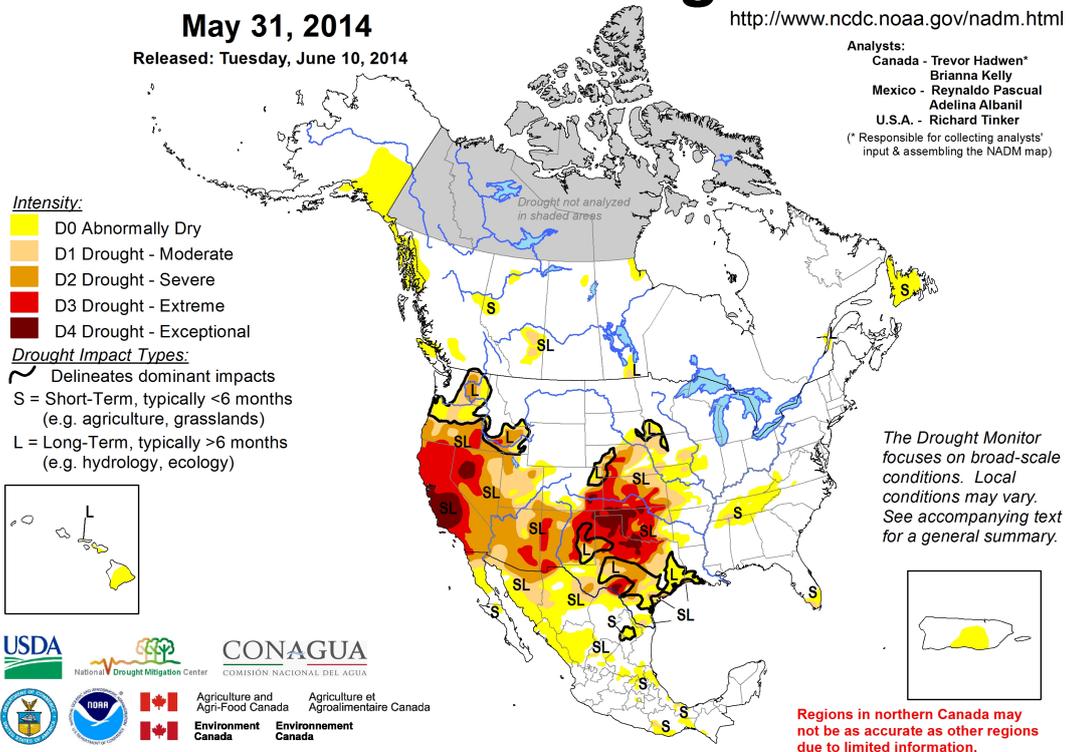


Figura 17: Monitor de Sequía de América del Norte. Tomado de U.S Drought Portal.

A continuación se muestra el mapa del PDSI basado en datos de las estaciones de México y en datos de la división climática de los estados contiguos de Estados Unidos. El mapa de PPN incluye datos de México, EE.UU y Canadá.

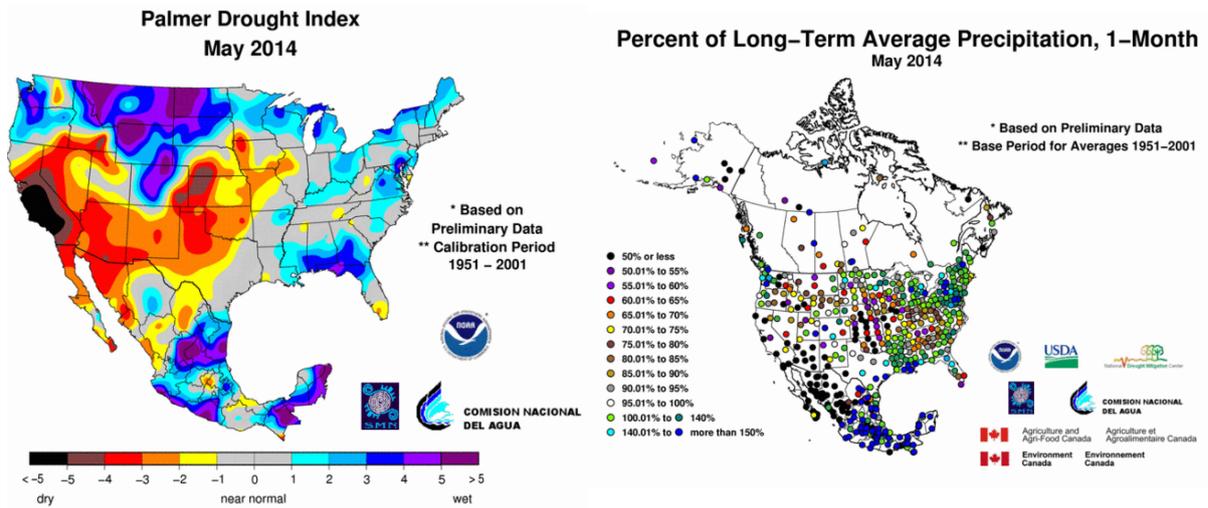


Figura 18: Mapa del PDSI y PPN mensual de México, Estados Unidos y Canadá. Tomado de National Oceanic and Atmospheric Administration (NOAA)

En México el Monitor de Sequía se realiza quincenalmente. Los índices utilizados son el Índice Estandarizado de Precipitación (SPI), Porcentaje de Precipitación Normal (PPN), Índice de Vegetación Diferencial Normalizado (NDVI), Índice de Salud de la Vegetación (VHI), entre otros.

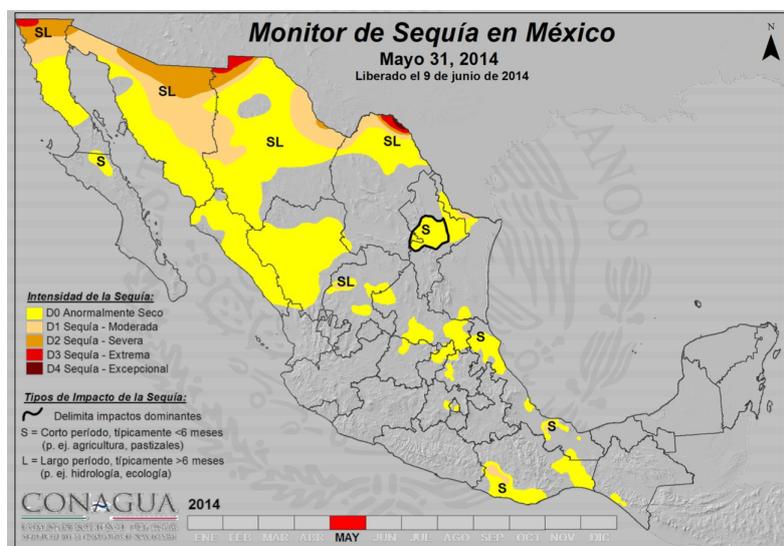


Figura 19: Monitor de Sequía en México. Tomado de CONAGUA Mexico.

Las páginas del Observatorio Europeo de la Sequía (European Drought Observatory – EDO) contienen información relevante de la sequía como mapas de indicadores provenientes de diferentes fuentes de datos (por ejemplo, las mediciones de precipitación, las mediciones por satélite, contenido de humedad del suelo).

El Indicador Combinado de Sequía (Combined Drought Indicator, CDI) se basa en el SPI, la Humedad del Suelo y la Fracción de la Radiación Activa Fotosintéticamente Absorbida (Fraction of Absorbed Photosynthetically Active Radiation – FAPAR) para identificar las áreas con potencial para sufrir sequía agrícola, áreas donde la vegetación ya está afectada por las condiciones de sequía, y áreas en proceso de recuperación de las condiciones normales después de un episodio de sequía.

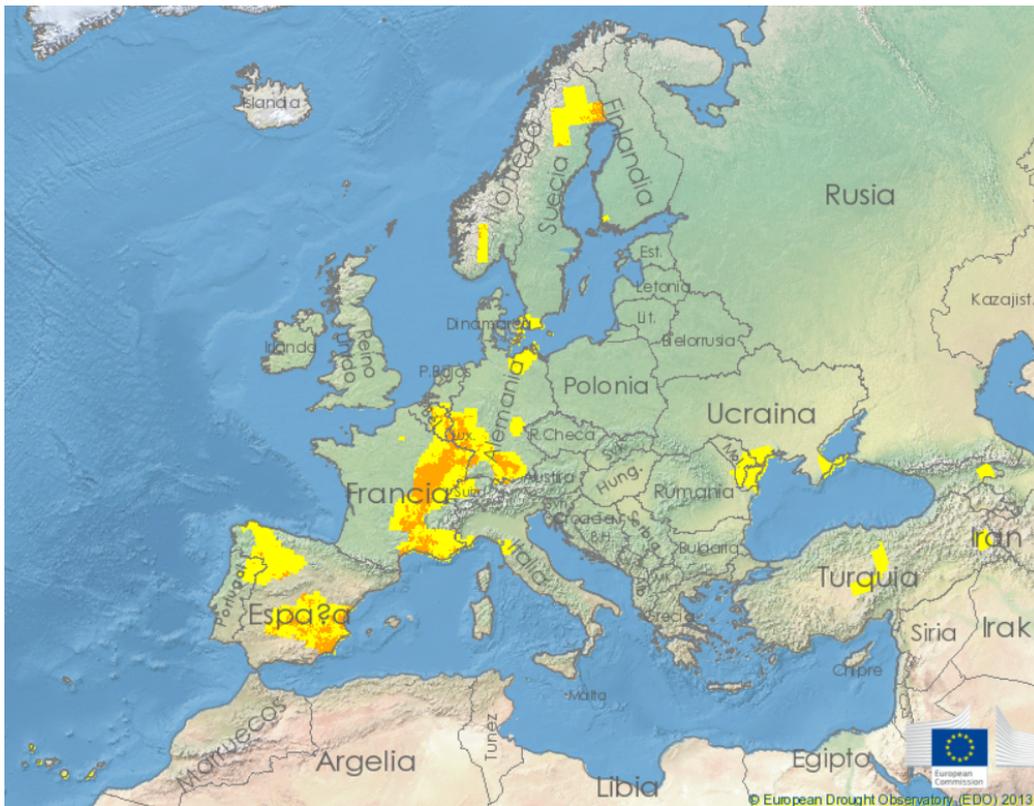


Figura 20: Indicador Combinado de la Sequía en Europa, Junio 2014. Tomado de Joint Research Centre.

El sistema de vigilancia de las sequías de la Oficina Meteorológica de Australia, en funcionamiento desde 1965, ha utilizado como indicadores los percentiles

de precipitación acumulativa de lluvia durante meses sucesivos para identificar las regiones con déficit o exceso de lluvia.

Las áreas en que las acumulaciones de lluvia son inferiores al décimo o al quinto percentil en períodos de tres meses o más se califican, de gravemente deficitarias o muy gravemente deficitarias respectivamente.

Este método es utilizado para medir la sequía meteorológica y poner en marcha los planes de intervención.

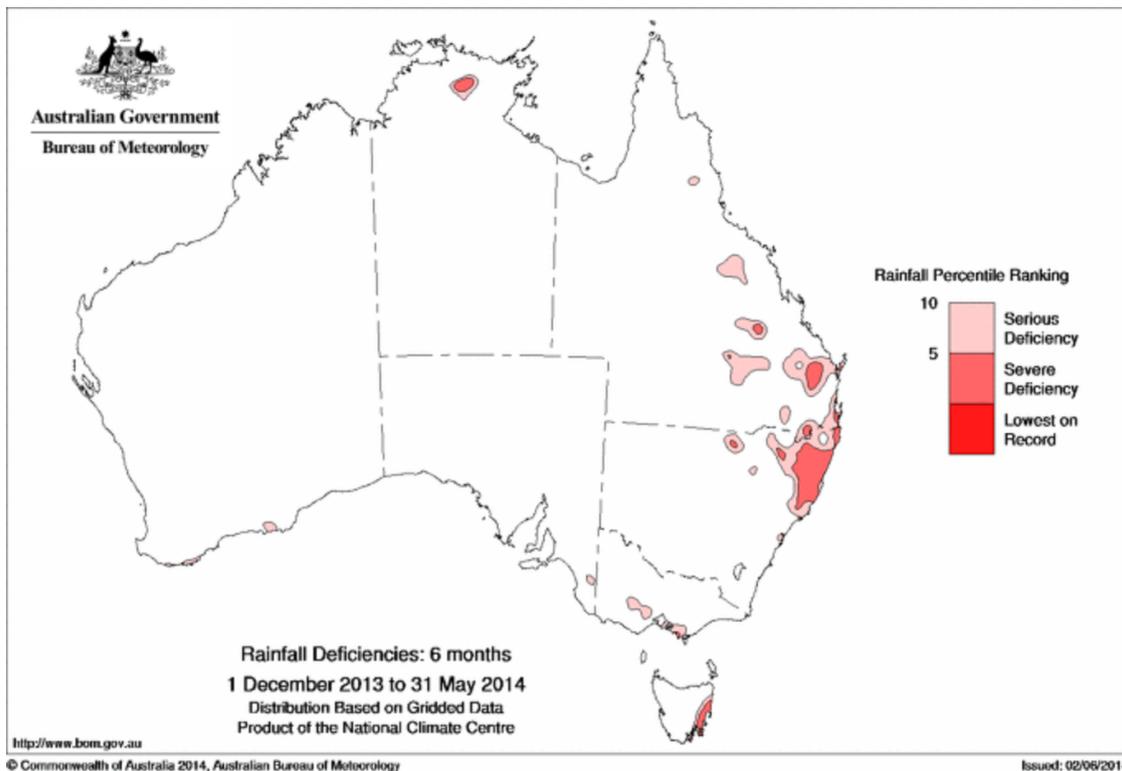


Figura 21: Deficiencia de lluvia en 6 meses en Australia. Tomado de Oficina de Meteorología de Australia.

En España se creó el Observatorio Nacional de la Sequía (ONS) a partir de una iniciativa conjunta de los antiguos Ministerio de Medio Ambiente y Ministerio de Agricultura, Pesca y Alimentación, actual Ministerio de Agricultura, Alimentación y Medio Ambiente (MAGRAMA). El observatorio pretende aglutinar a todas las administraciones hidráulicas españolas con competencias en materia de aguas, con el fin de constituir un centro de conocimiento, anticipación, mitigación y seguimiento de los efectos de la sequía en el territorio nacional.

El Observatorio Nacional de la Sequía publica periódicamente informes sobre la situación de la sequía hidrológica en las distintas demarcaciones hidrográficas intercomunitarias.

Estos resúmenes de la situación de la sequía hidrológica se publican periódicamente, una vez que en las distintas Confederaciones Hidrográficas se calculan los valores de los indicadores del estado de la sequía de acuerdo con los Planes Especiales de actuación en situación de alerta y eventual sequía (PES) correspondientes.

Se publica asimismo el mapa mensual con estos valores del indicador del estado de sequía en los sistemas de explotación de las demarcaciones hidrográficas intercomunitarias de toda España.



Figura 22: Mapa de seguimiento de los indicadores de estado de la sequía, julio 2014. Tomado de MAGRAMA.

Por su parte la Agencia Estatal de Meteorología (AEMET) monitorea la sequía con el Índice de Precipitación Estandarizado (SPI) el cual se actualiza mensualmente. Los mapas presentados, representan la distribución en el ámbito del territorio nacional, de los valores del SPI, correspondiente a un

determinado período de acumulación de la precipitación. Dichos períodos son: 1, 3 y 6 meses; 1, 2 y 3 años, y la parte transcurrida del año hidrometeorológico en curso (que se inicia el día 1 de septiembre).

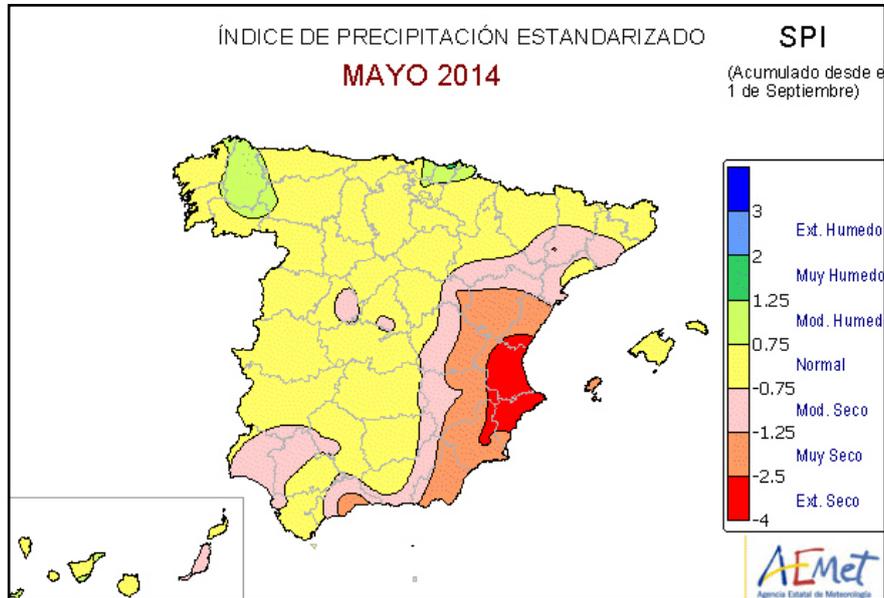


Figura 23: Monitoreo del SPI 9 meses. Tomado de AEMET.

3.5. Sequía y sus efectos en Ecuador y Manabí

En Ecuador las sequías afectan significativa y periódicamente a varias provincias. Según los datos registrados desde 1988 en la *base DesInventar de la Red de Estudios Sociales en Prevención de Desastres en América Latina (RED)*, las provincias de El Oro y Manabí han sido las más afectadas por las sequías (4 en 12 años). Seguido de Azuay, Guayas, Tungurahua, Pichincha, Esmeraldas y Carchi. No registrándose sequías significativas en el resto del país.

Basándose en la intensidad del déficit hídrico, partiendo de los datos del *Instituto Nacional de Meteorología e Hidrología (INAMHI)* para el periodo 1974-2000; se estableció que las zonas potencialmente expuestas a las sequías son las provincias de Guayas, Manabí y la franja occidental sur del país. Los alrededores de la ciudad de Esmeraldas, el valle del Chota, el sector de Santa Isabel (Azuay) y la región de Loja también son lugares potencialmente secos. (*D'Ercole and Trujillo 2003*).

Cabe mencionar que aunque los registros existentes en el país no cubren el periodo anterior al año 1988, se sabe que previamente se han producido eventos considerables. En 1968 se presentó en Loja una de las sequías más devastadoras del siglo. Desde entonces se ha originado un movimiento migratorio desde la provincia hacia las ciudades de Quito, Guayaquil y el Oriente. El censo realizado en 1990 refleja un 43% de reducción de la población en Loja.

Además de los registros de eventos en el país, se cuenta con información adicional que contribuye a completar el panorama nacional. De acuerdo a la reseña presentada por el gobierno ecuatoriano ante la *Comisión de Desarrollo Sostenible de las Naciones Unidas 1977*, el Ecuador tiene dos zonas desérticas; Palmira y El Oro. Sin embargo, las *Naciones Unidas* consideran que las provincias más afectadas por la desertificación y sequía son Manabí, Chimborazo y Loja (*D'Ercole and Trujillo 2003*).

En las últimas décadas Ecuador ha incurrido en pérdidas de más de \$ 4 mil millones por causa de la sequía (*WFP 2011*). En el último trimestre del 2009

hasta el primer mes del 2010 se registró una disminución de la precipitación, llegando a provocar una reducción de caudales en algunos ríos importantes del país, esta situación obligó al gobierno a declarar un estado de emergencia eléctrica, al no disponer de agua para la generación hidroeléctrica en algunos proyectos importantes, en especial el Hidropaute que genera el 60% de la hidroelectricidad en el país en condiciones normales y que debido a la sequía alcanzó en promedio a producir un 30%. Al mismo tiempo, algunas áreas geográficas tuvieron inconvenientes con la disponibilidad del recurso hídrico para consumo humano, agrícola y abrevaderos, en especial en las provincias centrales de la costa y la mayoría de la sierra.

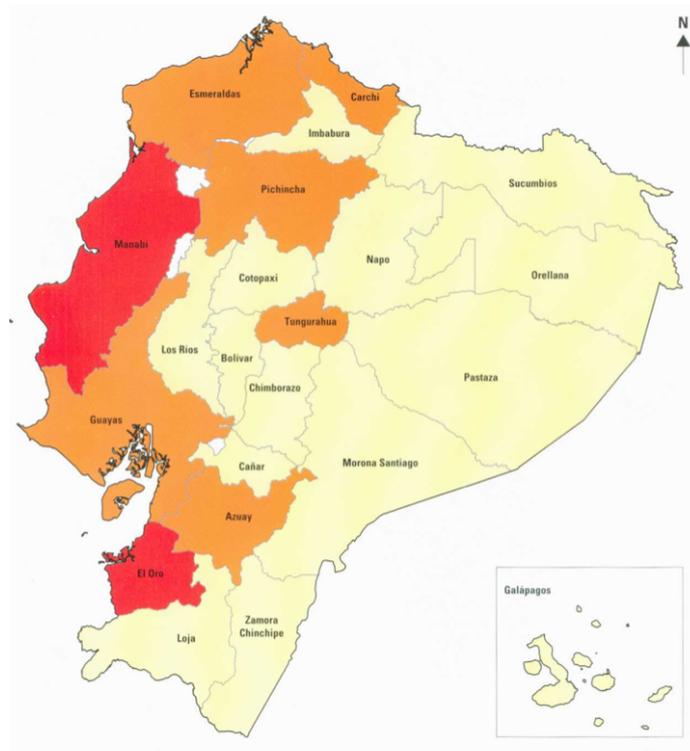


Figura 24: Sequías ocurridas en Ecuador entre 1988 y 1998. (amarillo 0, naranja 1-2, rojo 4). Tomado de COOPI - IRD - OXFAM.

La provincia de Manabí es una de las más afectadas por las sequías. Desde 1988 han ocurrido 4 sequías, ocasionando grandes pérdidas económicas en el sector agrícola. En el año 2009 las pérdidas alcanzarían la cifra de \$ 262 millones sin considerar al sector pecuario, las pérdidas en este sector no fue posible estimarlas debido a la carencia de información (Carvajal, Rodríguez et al. 2010). La sequía constituye la amenaza de mayor probabilidad de

ocurrencia en las cuencas del río Chone y Portoviejo con un potencial impacto respecto a su extensión. Así el 47.2% de la cuenca del río Chone y el 94% de la cuenca del río Portoviejo, tienen un nivel entre alto y máximo de ocurrencia de sequía. En la cuenca del río Chone, los períodos con escasez de lluvia duran un promedio de 5.5 meses; mientras que en la cuenca del río Portoviejo, persisten un promedio de 7.3 meses (*MAE and PNUD 2009*).

Los efectos devastadores causados por las sequías en las cuencas del río Chone y Portoviejo, muestran la fragilidad de las condiciones ecológicas y topográficas de las cuencas, así como también la fragilidad institucional, situación que pone en riesgo permanente a la población cada vez que se presenta el fenómeno.

3.5.1. Gestión de la sequía en Manabí

El enfoque que se le ha dado al manejo de este fenómeno en el Plan Hidráulico de Manabí (PHIMA) es calcular la precipitación total anual que correspondería a una sequía con un determinado período de retorno y cuantificar las zonas bajo condiciones muy severas de sequía. Los resultados muestran que los años secos más comunes que se han presentado responden a precipitaciones que corresponden a períodos de retorno de sequías de 10 y 25 años. Para periodos continuos de dos o más años secos existe el riesgo de que se presenten cada 25 años (*Carvajal, Rodríguez et al. 2010*).

Se podría concluir que de cada 4 años existe el riesgo de que uno de ellos sea de sequía extrema y que de cada 25 años existe el riesgo de que dos o más años seguidos sean de sequía; siendo este último el que más incide en la formulación del Plan Hidráulico.

El área cubierta con sequías de períodos de retorno entre 2 y 50 años abarca superficies del 10 y 30% respectivamente del área total de la provincia, estando concentradas en las Zonas de Desarrollo Suroeste y Central de la provincia de Manabí.

Para paliar los efectos de este fenómeno climatológico se optó por la construcción de represas para almacenar el agua para la temporada seca. Sin embargo la construcción de las represas solo cubre una pequeña área de la

provincia (zona de riego), concentrándose principalmente en la zona central (cuencas hidrográficas de los ríos Chone y Portoviejo), encontrándose algunas obras en fase de construcción, como es el caso del proyecto Múltiple Chone, infraestructura planificada en la cuenca del río Chone.

La creación de la Corporación Reguladora del Manejo Hídrico de Manabí (CRM) fue el primer paso del gobierno nacional para el control de inundaciones y sequías que afectan a la provincia (*Carvajal, Rodríguez et al. 2010*). Cabe indicar que la CRM fue fusionada con el Centro de Desarrollo del Norte de Manabí (CEDEM) en septiembre del 2009, para la conformación del Organismo de gestión de recursos hídricos por demarcación hidrográfica de Manabí, asumiendo el manejo de estas entidades la Secretaría Nacional del Agua (SENAGUA).

(*Carvajal, Rodríguez et al. 2010*) en Ecuador existen dificultades tanto en el marco normativo como institucional que han limitado la gestión de riesgo y el manejo del recurso hídrico. En el marco institucional, las debilidades identificadas están al interior de las organizaciones, así como en la coordinación interinstitucional. Durante el estudio del Proyecto Adaptación al Cambio Climático a través de una Efectiva Gobernabilidad del Agua en el Ecuador (PACC), se estimó el Índice de Vulnerabilidad Institucional (IVINS) que permite identificar aquellas zonas prioritarias donde se requiere un fortalecimiento de la capacidad institucional (intra e interinstitucional) como inversión para reducir la vulnerabilidad frente a potenciales eventos climáticos. También se estimó el Índice de vulnerabilidad de la infraestructura (IVINF), que describe la calidad de la infraestructura existente, que podría prevenir la ocurrencia de desastres o mitigar la magnitud de sus impactos.

De todas las regiones analizadas en el PACC - Ecuador; los cantones de las cuencas Chone y Portoviejo tienen una capacidad institucional menor al promedio de todas las regiones estudiadas. De estos cantones, la mayoría tienen una capacidad institucional baja, es decir, una vulnerabilidad alta, siendo los más vulnerables Bolívar, Tosagua y Portoviejo. Respecto a la capacidad en infraestructura para prevenir o disminuir el impacto de las sequías, se observa que en la mayoría de los cantones existentes al interior de las cuencas Chone y



Portoviejo, esta es alta debido a las importantes obras hídricas (sistemas de riego, embalses, trasvases, redes climatológicas) con las que se cuenta; lo que indica una baja vulnerabilidad ante el fenómeno (*Carvajal, Rodríguez et al. 2010*).

En Ecuador las múltiples reformas estructurales, aprobadas por los gobiernos de turno, debilitaron las instituciones públicas entre ellas las del sector hídrico, llegando incluso a desaparecerlas. El actual gobierno ecuatoriano ha impulsado un proceso acelerado de institucionalización de la gestión integrada para lo cual ha creado la SENAGUA (Decreto Ejecutivo 1088 del 15 de mayo de 2008) como ente rector del sector hídrico, con todas las capacidades para crear e implementar políticas públicas que garanticen el pleno cumplimiento de los mandatos constitucionales, los instrumentos jurídicos, técnicos y sociales para impulsar la distribución equitativa del agua, y la debida planificación para asegurar las inversiones necesarias para potenciar las contribuciones del sector (*SENAGUA 2010*).

3.6. Eventos climáticos ENSO

3.6.1. Evento El Niño

"El Niño, Oscilación del Sur" (ENOS) por su acrónimo en inglés ENSO (El Niño-Southern Oscillation) es la interacción de un fenómeno oceánico - atmosférico, que ocurre en la región del océano Pacífico tropical, aproximadamente cada 2 a 7 años, cuyo elemento central está relacionado a la variabilidad climática de corto plazo a través del globo y particularmente en el trópico (*Jiménez 2008*).

Este ciclo global tiene dos fases: En el océano se manifiesta como una oscilación de la temperatura superficial del mar entre una fase cálida ("El Niño") y una fase fría ("La Niña") a lo largo del Pacífico tropical, y en la atmósfera como una oscilación entre una fase negativa ("El Niño") y una fase positiva ("La Niña") de la Oscilación del Sur (OS) (*Jiménez 2008*).

3.6.2. Oscilación del Sur (Southern Oscillation)

La Oscilación del Sur, es un enlace de sistemas barométricos en el Océano Pacífico, visto como un balanceo de presiones entre el pacífico tropical sudoriental y la región Australasia (suroeste de Oceanía), que controla las variaciones de presión superficial, vientos, temperatura y precipitaciones en los trópicos de esta cuenca oceánica (*Quinn and Neal 1992*).

3.6.3. Regiones El Niño

Para comprender cómo se desarrollan los eventos El Niño/La Niña del ciclo ENSO a lo largo del Océano Pacífico Ecuatorial, se han definido cuatro regiones de acción. De oeste a este, estas regiones son: Regiones Niño 4, Niño 3, Niño 3.4 y Región Niño 1+2 (*Jiménez 2008*).

- Regiones Niño 4 y 3: Se encuentran ubicadas en el lado occidental del Pacífico y se caracterizan por presentar las máximas anomalías de temperatura superficial del mar.
- Región Niño 3.4: Es una subregión comprendida entre las regiones Niño 4 y 3 y representa un buen indicador de la correlación entre la temperatura superficial del mar y el Índice de Oscilación del Sur.

- Región Niño 1+2: Incluye las costas de Perú y Ecuador incluidas las Islas Galápagos, esta región representa un indicador de los cambios inducidos por El Niño en los patrones de variabilidad de la costa del Pacífico de América del Sur.

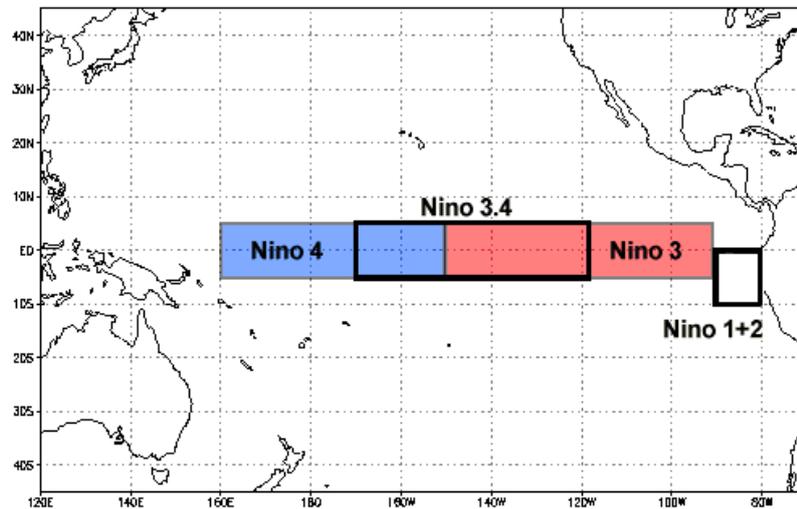


Figura 25: Regiones El Niño. Tomado de National Oceanic and Atmospheric Administration (NOAA)

3.6.4. Evento La Niña

El término "La Niña" surge como una expresión opuesta a "El Niño", debido a que presenta condiciones contrarias a este evento. Algunos autores la denominan también como "El Viejo" o "El Anti-niño".

La fase fría del ciclo ENSO, conocida como La Niña, está generalmente relacionada con la presencia de anomalías negativas de la temperatura superficial del mar, con una termoclina menos profunda que lo normal en el Pacífico Ecuatorial, al oeste de la Línea de Cambio de Fecha. En la región del Pacífico Ecuatorial oriental este evento tiende a fortalecer el desarrollo del Frente Ecuatorial así como eventos de surgencias (Jiménez 2008) y (Tutasi, Palma et al. 2011).

3.7. Índices Climáticos

Un índice climático es un valor que puede ser usado para describir el estado y los cambios en el sistema climático. Corresponden generalmente a una expresión numérica que resume la complejidad de una serie de procesos físicos que se desarrollan en el seno de la atmósfera y el océano y dentro de la capa propia de su interacción y permiten cuantificar las relaciones entre las diferentes variables climáticas y los fenómenos de variabilidad climática (*Oviedo Torres 2011*). Los primeros índices climáticos se definieron hace aproximadamente un siglo, como es el caso de la Oscilación del Atlántico Norte (NAO, por sus siglas en inglés), el primer patrón de teleconexión¹ detectado. (*Quiroz 2011*).

3.7.1. Oscilación del Atlántico Norte (North Atlantic Oscillation, NAO)

Es una fluctuación de la masa atmosférica a gran escala entre el centro de alta presión subtropical localizado en la Azores (38° Norte) y el centro de baja presión subpolar localizado en Islandia (65° Norte). Este índice varía de un año a otro año, pero también presenta una tendencia a permanecer en una fase en intervalos que duran varios años (*Oviedo Torres 2011*).

3.7.2. Índice de Oscilación del Sur (Southern Oscillation Index, SOI)

Es un indicador de la presencia de un evento ENSO, que mide la diferencia entre la anomalía promedio mensual de la presión atmosférica superficial en Tahití (Polinesia francesa), y el Puerto de Darwin (Australia).

Una de las propiedades más importantes del Índice de Oscilación del Sur, es que los grandes cambios en amplitud, de un máximo a un mínimo están íntimamente asociados a El Niño. Esta asociación es vista como una evidencia de la interacción entre el océano y la atmósfera en el Pacífico. Cuando este número es positivo, tenemos el evento La Niña y cuando el número es negativo, el evento es El Niño (*Jiménez 2008*).

¹Las teleconexiones son correlaciones significativas entre fluctuaciones simultáneas que ocurren entre variables meteorológicas de áreas geográficas separadas (Wallace y Gutzler, 1981). Glantz et al. (1991) las describen como "interacciones atmosféricas entre áreas ampliamente separadas".

3.7.3. Temperatura superficial del Mar (Sea Surface Temperature, SST)

La temperatura superficial del mar es un valioso indicador de la estructura térmica de la capa superior de los océanos. En consecuencia, utilizamos la SST como variable explicativa de esta dinámica, tomando en consideración también que esta variable está estrechamente relacionada con los procesos convectivos que se generan en la atmósfera que se yace sobre ella (*Oviedo Torres 2011*).

3.7.4. Índice Oceánico de El Niño (Oceanic Niño Index, ONI)

Es una serie de tiempo de las anomalías de la temperatura superficial marina calculadas a partir de mediciones in situ efectuadas en la región El Niño 3.4 (5° N-5° S, 120-170° O). El periodo base abarca de 1971 a 2000 y los datos se obtienen con el método de medias móviles aplicado a periodos de tres meses. La temperatura utilizada para calcular el índice pertenece al banco de datos Extended Reconstructed Sea Surface Temperature (ERSST.v2) del National Climatic Data Center de la NOAA. Los episodios cálidos (El Niño) y fríos (La Niña) son definidos cuando la anomalía se encuentra por arriba o por debajo de un valor umbral (± 0.5 °C) respectivamente; durante al menos, cinco periodos consecutivos (*Quiroz 2011*).

3.7.5. Índice multivariado de ENOS (Multivariate ENSO Index, MEI)

Este índice puede ser entendido como la media ponderada de seis variables sobre el Pacífico tropical, a saber: presión atmosférica a nivel del mar, componente zonal (este-oeste) y meridional (norte-sur) del viento en superficie, temperatura de la superficie del mar, temperatura del aire en superficie, y cantidad total de nubosidad. Los valores positivos del MEI representan la fase cálida de ENSO (EL Niño) (*Oviedo Torres 2011*).

3.8. Relación entre la sequía y los índices climáticos

Varios estudios se han llevado a cabo para entender las sequías y establecer su relación con los índices climáticos a gran escala. Por ejemplo:

(Hoerling and Kumar 2003) analizaron las sequías de 1998-2002 que afectaron a los Estados Unidos, el sur de Europa y el suroeste de Asia, y establecieron que tal sequía estaba vinculada a una influencia oceánica común. Temperaturas superficiales del mar fría, en el Pacífico tropical oriental y temperaturas superficiales del mar caliente, en los océanos Pacífico e Índico tropicales occidentales; fueron notablemente persistentes durante este período.

De acuerdo con los resultados de estudios realizados *(Ropelewski and Halpert 1987)* y *(Kiladis and Diaz 1989)* en el sur este de América del Sur las señales del evento El Niño se manifiestan con incrementos de las temperaturas y precipitaciones durante los meses noviembre-febrero. Por el contrario, los eventos La Niña están asociados con anomalías negativas de las temperaturas invernales y valores de precipitación inferiores a lo normal para los meses junio-diciembre. *(Ropelewski and Halpert 1996)* demostraron dos aspectos importantes: 1) que la relación entre ENSO y las precipitaciones en el sur este de América del sur tiende a manifestarse en diferentes estaciones para ambos eventos “cálidos” (El Niño) y “fríos” (La Niña); y 2) que las anomalías de precipitación son más fuertemente asociadas con los años La Niña.

(Barlow, Cullen et al. 2002) tanto la duración prolongada, del evento El Niño Oscilación Sur fase fría (La Niña) de los años 1998-2001 y la temperatura superficial del mar inusualmente cálida en el Pacífico occidental, parecen contribuir a la severidad de la sequía ocurrida en ese periodo en el centro y el suroeste de Asia.

(Piechota and Dracup 1996) utilizaron series de tiempo mensual de PDSI para investigar la respuesta hidrológica en los Estados Unidos a las fases extremas de la Oscilación del Sur (El Niño y La Niña). Su estudio observó la relación más fuerte que existe entre El Niño y años de sequía extrema en el noroeste del Pacífico. Una relación fuerte se observó también en el sur de



Estados Unidos, donde se produjeron condiciones secas consistentemente durante los eventos de La Niña.

(Bordi and Sutera 2001) encontraron que las condiciones secas sobre Europa, Asia oriental, África central y la región del Caribe están interconectados y afectadas por la variabilidad climática tropical. Del mismo modo, *(Chiew, Piechota et al. 1998)* demostraron que la incidencia de las sequías en Australia estaba estrechamente asociada con los eventos de El Niño.

4. METODOLOGÍA

Para la ejecución de la presente investigación se establecieron cuatro fases, mismas que permitieron dar cumplimiento a los objetivos específicos planteados. El análisis de la sequía se rigió al periodo octubre/1964-septiembre/2012.

Para el desarrollo de la investigación se dividió el área de estudio “Demarcación Hidrográfica de Manabí”, en tres zonas denominadas: Zona Norte, Zona Centro y Zona Sur. La zona centro fue a su vez subdividida en dos cuencas (cuenca del río Chone y cuenca del río Portoviejo) y tres subcuencas (subcuenca del río Carrizal, subcuenca del río Chico y subcuenca cabecera del río Portoviejo) hidrográficas. La subcuenca del río Carrizal está ubicada en la cuenca del río Chone, mientras que las subcuencas restantes forman parte de la cuenca del río Portoviejo. Para un mejor análisis de los resultados, dichas zonas se codificaron:

ZONA	CÓDIGO
Zona centro de la D.H.M.	1000
Cuenca del río Chone	1001
Subcuenca del río Carrizal	1001.01
Cuenca del río Portoviejo	1002
Subcuenca del río Chico	1002.01
Cabecera río Portoviejo	1002.02
Zona Norte de la D.H.M.	2000
Zona Sur de la D.H.M.	3000

Tabla 7: Codificación de zonas de estudio

FASE 1: Revisión y selección de índices de sequía

La fase 1 consistió en la revisión de los índices de sequía utilizados a nivel mundial para la posterior selección de los indicadores a aplicar. Los índices escogidos fueron el Standardized Precipitation Index (SPI); el Palmer Drought Severity Index (PDSI) y el Índice de Estado (I.e.). La fase 1 también se dedicó a la recopilación de los datos, a la caracterización de las condiciones climáticas y a la identificación de los periodos secos en el ámbito de estudio.

FASE 2: Aplicación de los índices de sequía

Los datos utilizados en la fase 2, fueron: series históricas de precipitación y temperatura media mensual generadas por el Modelo Distribuido PATRICAL (cálculo del SPI) y la simulación hidrológica del Modelo Agregado de Témex realizada a la subcuenca del río Carrizal, subcuenca del río Chico y subcuenca cabecera del río Portoviejo² (cálculo del PDSI). Así mismo se obtuvieron datos de los embalses Poza Honda y La Esperanza³.

La aplicación del SPI, incluyó el uso del software SPI_SL_6⁴ creado por el National Drought Mitigation Center de la Universidad de Nebraska Lincoln.

Además se utilizó el Modelo Distribuido PATRICAL para la generación de mapas de SPI.

FASE 3: Validación de los resultados

Para la fase 3 se utilizaron los registros de prensa que abordan el tema de sequía en la zona de estudio. Los registros se obtuvieron del Sistema de Inventario de Desastres (DesInventar)⁵.

FASE 4: Contraste de los índices de sequía con índices climáticos

La cuarta y última fase del estudio, se desarrolló mediante el uso de las series mensuales del Índice de Oscilación del Sur (Southern Oscillation Index, SOI)⁶; y de la Temperatura Superficial del Mar (Sea Surface Temperature, SST)⁷.

² Información Tomada de: Rivadeneira, J. (2014) "Evaluación del efecto del cambio climático bajo escenarios de emisiones SRES y RCP en la Demarcación Hidrográfica de Manabí - Ecuador."

³ Información proporcionada por la Secretaría Nacional del Agua (SENAGUA)

⁴ <http://drought.unl.edu/MonitoringTools/DownloadableSPIProgram.aspx>

⁵ <http://www.desinventar.org/es/>

⁶ <http://www.cpc.ncep.noaa.gov/data/indices/soi>

⁷ <http://www.cpc.ncep.noaa.gov/data/indices/sstoi.indices>

4.1. Revisión y selección de índices de sequía

La revisión comprendió todas las actividades relacionadas con la búsqueda de información referente a los índices de sequía desarrollados y aplicados a nivel mundial para monitorear el evento y anticiparse al mismo.

Los índices seleccionados fueron: el Índice de Precipitación Estandarizado (Standardized precipitation Index, SPI), el Índice de Severidad de Sequía de Palmer (Palmer Drought Severity Index, PDSI) y el Índice de Estado (I.e.), desarrollado por Mckee et al, 1993, Palmer 1965 y CHJ 2000; respectivamente.

Para establecer las características climáticas de la D.H.M se analizaron las series de precipitación y temperatura generadas por PATRICAL. El análisis comprendió el periodo octubre/1964-septiembre/2012. La evapotranspiración potencial (ETP), se tomó de la simulación hidrológica. Los periodos secos en la demarcación fueron identificados partiendo de la precipitación mediana anual, así los periodos que registraron una precipitación por debajo de la mediana han sido considerados periodos secos.

4.2. Aplicación de los índices de sequía

4.2.1. Índice de Precipitación Estandarizado (SPI)

El cálculo del SPI se efectuó a escalas 3, 6, 12 y 24 meses. Dicho cálculo se basó en las series de precipitación media mensual generadas por el Modelo Distribuido PATRICAL para el periodo 1964-2014.

Estas series se ajustaron a una distribución de probabilidad y a continuación se transformaron en una distribución normal. La distribución de probabilidad utilizada fue la log normal, esto se estableció después de computar varias distribuciones (normal, raíz, log normal y gamma).

Posterior a ello se procedió a la obtención de valores del SPI, mediante la fórmula propuesta por (McKee, Doesken et al. 1993).

$$SPI = \frac{X_{ij} - \bar{X}_i}{\sigma_i}$$

Donde:

X_{ij} : Precipitación de la estación observada y observación histórica

\bar{X}_i : Precipitación media de la estación observada

σ_i : Desviación estándar de la estación observada

Considerando la magnitud del cálculo (5 escalas de tiempo y 3 zonas de estudio) se optó por la utilización del software SPI_SL_6 creado por el National Drought Mitigation Center de la universidad de Nebraska Lincoln para continuar con los cálculos. Previo a ello fue necesario calcular mediante la fórmula descrita anteriormente el SPI de 1 mes, para correlacionarlo con el SPI (1 mes) resultante de la aplicación del software, ya que este ajusta la serie histórica de precipitaciones a la distribución gamma.

Se establecieron las clases de sequía acontecidas en el D.H.M; usando el sistema de clasificación presentado por (McKee, Doesken et al. 1993), mostrado en la *Tabla 4* de este documento.

4.2.2. Índice de Severidad de Sequía de Palmer (PDSI)

Para el cálculo del PDSI, se aplicó la versión planteada para el Modelo Hidrológico Agregado de Témex⁸, para ello fue necesario utilizar la simulación hidrológica realizada a la subcuenca del río Carrizal, subcuenca del río Chico y subcuenca cabecera del río Portoviejo. En la versión de Témex el Ecurrimiento Potencial (PRO) es igual a la Humedad del suelo en el mes considerado (Hi). A esta formulación (planteada por Palmer 1965) se le realizó una modificación; siendo ahora, el PRO igual a 3 veces la Precipitación (P) menos la Recarga Potencial (PR) ($PRO = 3P - PR$). Este cambio se fundamenta de la siguiente manera: (Palmer 1965) define que PRO es igual a la Capacidad de Agua Disponible (AWC) menos la Recarga Potencial ($PRO = AWC - PR$). Sin embargo él reconoció que este planteamiento no es una manera particularmente elegante de manejar el problema y redefinió AWC como tres veces la precipitación normal para el mes; y mencionó que aunque este seguirá siendo un enfoque bastante arbitrario, al menos, reconoce que la P y la AWC son términos relacionados. Se empleó la clasificación de sequías de Palmer 1965 para definir los eventos ocurridos en la demarcación. Presentada en la *Tabla 6* de este documento.

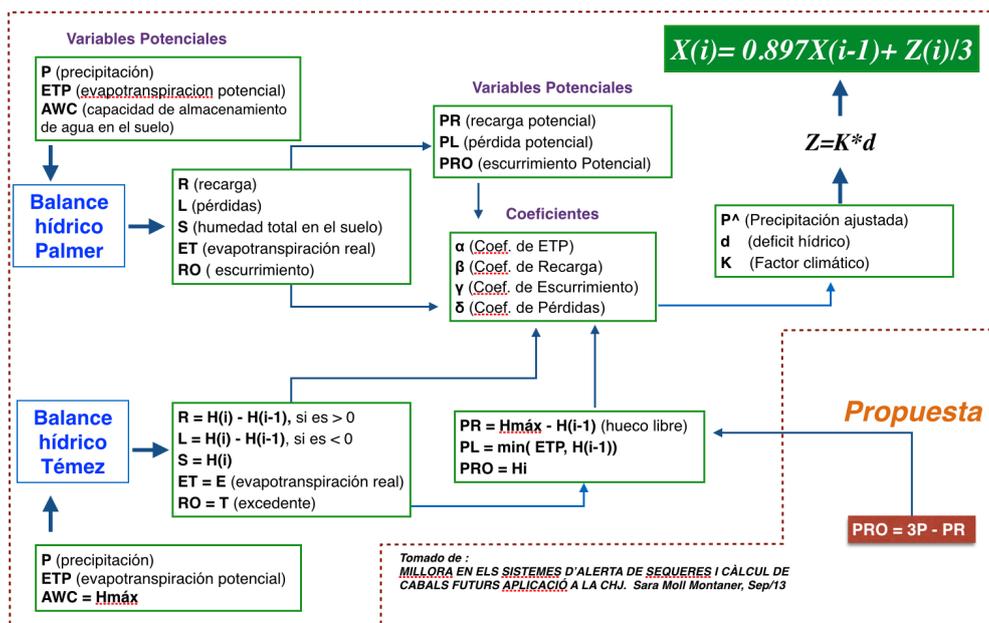


Figura 26: Esquema metodológico de cálculo del PDSI.

⁸ Tomado de: Moll, S. (2013) Millora en els sistemes d'alerta de sequeres i càlcul de cabals futurs aplicació a la CHJ.

4.2.3. Índice de Estado (I_e)

El Índice de Estado fue aplicado en la cuenca del río Chone (cuenca hidrográfica de la Zona Centro), en el embalse La Esperanza. Los datos utilizados fueron los volúmenes históricos registrados, en el periodo 2005-2012.

La expresión del Índice de Estado I_e es la siguiente:

$$\text{Si } V_i \geq V_{med} \Rightarrow I_e = \frac{1}{2} \left(1 + \frac{V_i - V_{med}}{V_{max} - V_{med}} \right)$$

$$\text{Si } V_i < V_{med} \Rightarrow I_e = \frac{V_i - V_{min}}{2(V_{med} - V_{min})}$$

Siendo:

V_i: Valor considerado en el mes de seguimiento

V_{med}: Valor medio en la serie histórica considerada

V_{max}: Valor máximo en la serie histórica considerada

V_{min}: Valor mínimo en la serie histórica considerada

4.3. Validación de los resultados

Los resultados obtenidos de la aplicación del SPI (representados en mapas) fueron validados con los registros de prensa que abordan el tema de sequía en la demarcación. Previo a esto se contrastó el SPI con el PDSI).

La validación se realizó para establecer la relación entre los eventos que refleja el índice y los eventos históricos suscitados. Los registros de prensa se obtuvieron del Sistema de Inventario de Desastres (DesInventar).

4.4. Contraste de índices de sequía con índices climáticos

El contraste comprende la última fase de la investigación. Este consiste en la comparar los resultados obtenidos de la aplicación del SPI, con los resultados de los índices climáticos (Southern Oscillation Index, SOI; y Sea Surface Temperature, SST). Esto con el fin de establecer si existe relación entre los eventos climáticos El Niño - Southern Oscillation, ENSO; con la manifestación de la sequía en la Demarcación Hidrográfica de Manabí - Ecuador.

Los datos del SOI y la SST comprenden el periodo 1951-2014 y 1982-2014, respectivamente, los mismos fueron descargados de la página web de la National Oceanic and Atmospheric Administration (NOAA).

5. APLICACIÓN Y RESULTADOS

5.1. Revisión y selección de índices de sequía

En base a la revisión bibliográfica se seleccionó el Índice de Precipitación Estandarizado, el Índice de Severidad de Sequía de Palmer y el Índice de Estado, para analizar las sequías en la Demarcación Hidrográfica de Manabí.

Características Climáticas

El análisis de las series de precipitación, temperatura y evapotranspiración potencial (ETP), en el periodo octubre/1964-septiembre/2012, permitieron establecer que la Demarcación Hidrográfica de Manabí, presenta una estación lluviosa (invierno) y una seca (verano). En las gráficas siguientes se puede apreciar que en invierno, la temperatura puede alcanzar 26.7 °C, la precipitación más de 300 mm y en consecuencia la ETP puede llegar a los 140 mm. Mientras que en verano la temperatura, precipitación y ETP pueden descender a 24.7 °C, 0.5 mm y 110 mm respectivamente.

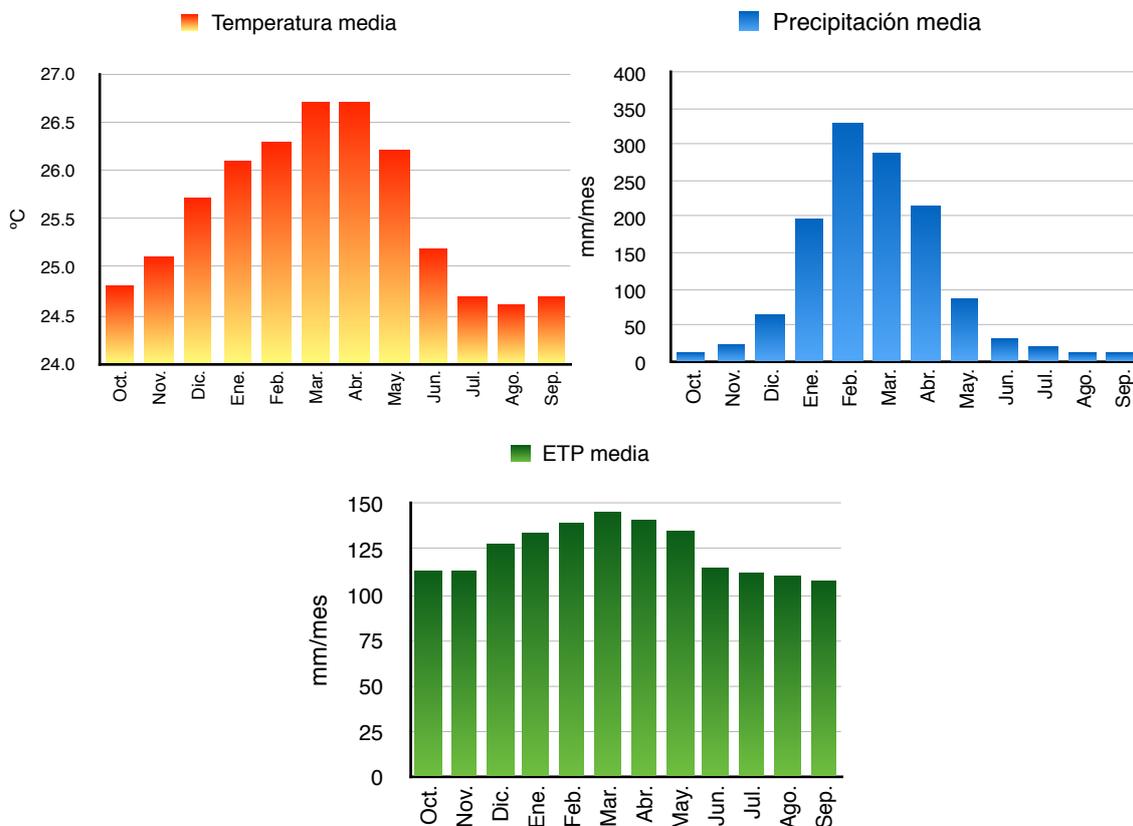


Figura 27: Representación gráfica de la temperatura, precipitación y ETP media mensual de la DHM.

La temperatura promedio de la demarcación varía entre 24 °C y 26 °C, variando espacialmente de oeste a este de menos a más. En la *Figura 28* puede apreciarse los cambios de temperatura anual, así en los meses de Enero a Mayo (invierno) se registran las máximas temperaturas del año y de Junio a Noviembre (verano) las mínimas, es decir la temperatura varía gradualmente en función de las temporadas.

En la *Figura 29* se muestra que la precipitación varía en el transcurso del año de 300 a 40 mm, teniendo las máximas precipitaciones en invierno y las mínimas en verano. La temporada lluviosa está comprendida entre los meses Diciembre a Mayo, misma que puede presentar una precipitación media 196 mm/mes.

En contraste la temporada seca (Junio-noviembre) puede registrar una precipitación media de 19 mm/mes. Los meses Diciembre y Junio se consideran meses de transición entre la estación de invierno y verano, respectivamente.

En Ecuador se presentan los fenómenos cálido del Pacífico (El Niño) y frío del Pacífico (La Niña). “El Niño” en el país históricamente se ha evidenciado por el incremento de la temperatura en el océano y un aumento de la precipitación. Mientras que “La Niña” se caracteriza por todo lo contrario (descenso de temperatura del mar y precipitación).

En presencia del fenómeno “El Niño”, se puede registrar el doble de la precipitación normal, de igual manera, el periodo de lluvias puede extenderse durante todo el verano teniendo así un mínimo de 12 meses continuos de lluvias. Por su parte “La Niña” se manifiesta en la temporada lluviosa, en consecuencia la estación seca puede extenderse de 12-15 meses.

Temperatura media mensual distribuida 1964 - 2012

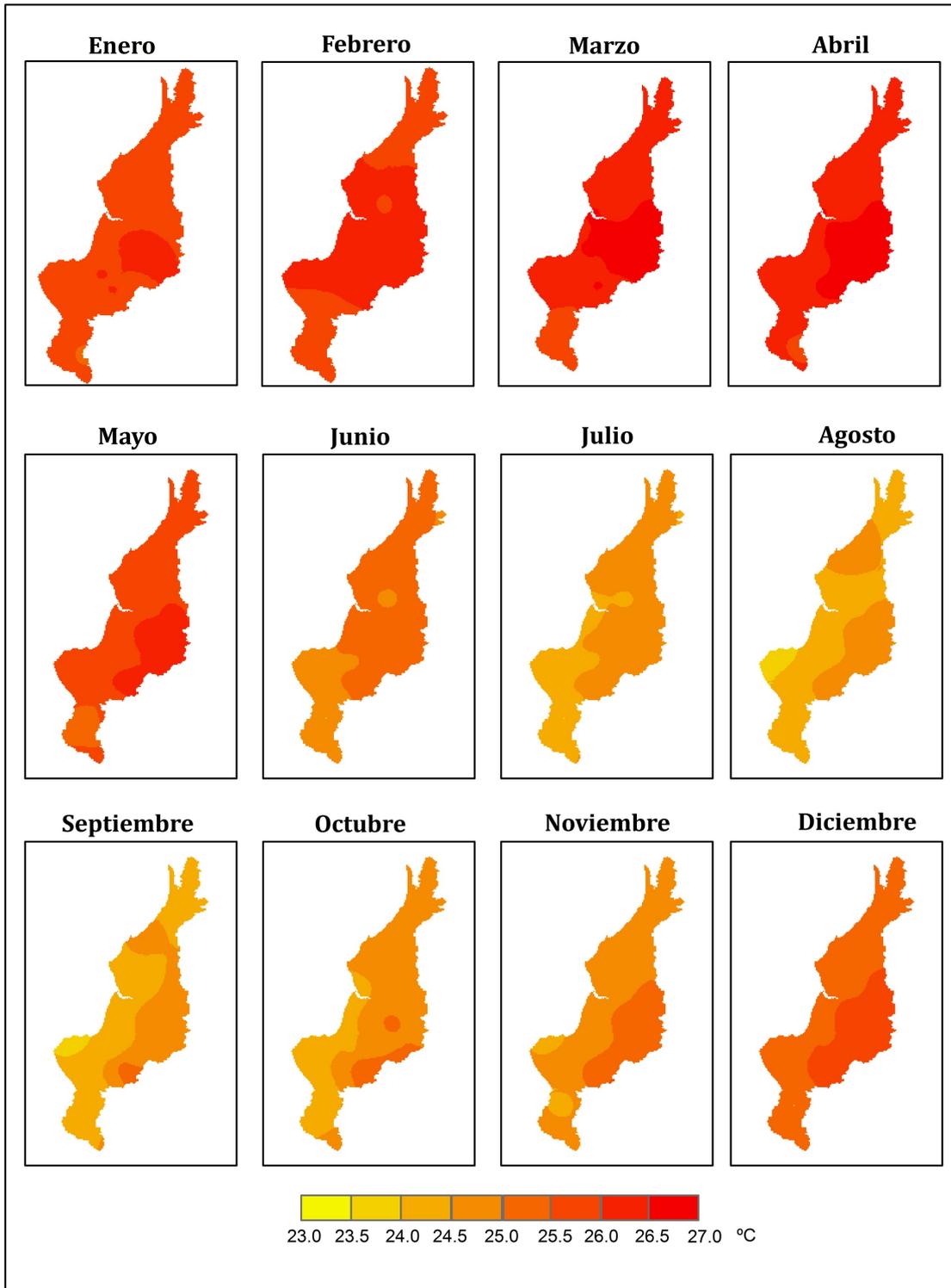


Figura 28: Temperatura media mensual distribuida, calculada respecto de las observaciones en la DHM desde 1964 - 2012

Precipitación media mensual distribuida 1964 - 2012

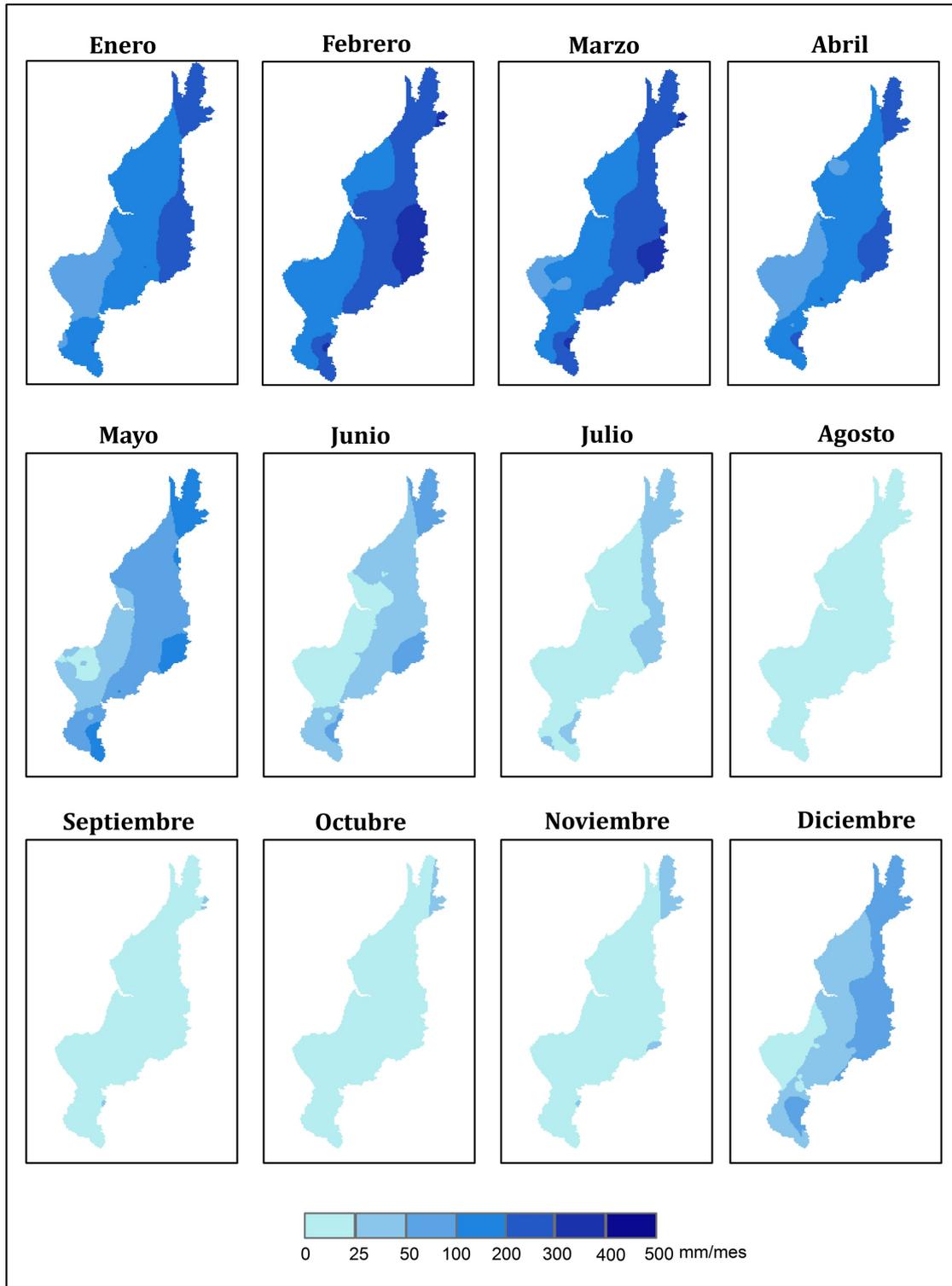


Figura 29: Precipitación media mensual distribuida, calculada respecto de las observaciones en la DHM desde 1964 - 2012

Identificación de ciclos secos

Los periodos secos en la demarcación fueron identificados considerando los periodos que registran una precipitación por debajo de su mediana anual. Se calculó la mediana de la precipitación más no la media, debido a que la serie es sesgada por la presencia del fenómeno de El Niño.

Este análisis se efectuó a las 3 zonas en las que fue dividida la demarcación (Zona Norte, Zona Centro y Zona Sur) incluyendo la subdivisión de la zona centro (dos cuencas: cuenca del río Chone y cuenca del río Portoviejo).

Zona 1000

En la zona 1000, se registraron 11 periodos secos: 1967/68-69/70, 1973/74, 1977/78-81/82, 1983/84-85/86, 1987/88, 1989/90-90/91, 1993/94-95/96, 1999/00, 2002/03-04/05, 2006/07 y 2008/09; mismos que presentaron una duración de 3, 1, 5, 3, 1, 2, 3, 1, 3, 1, y 1 meses, respectivamente. Siendo el periodo más extenso 1977/78 con 5 meses.

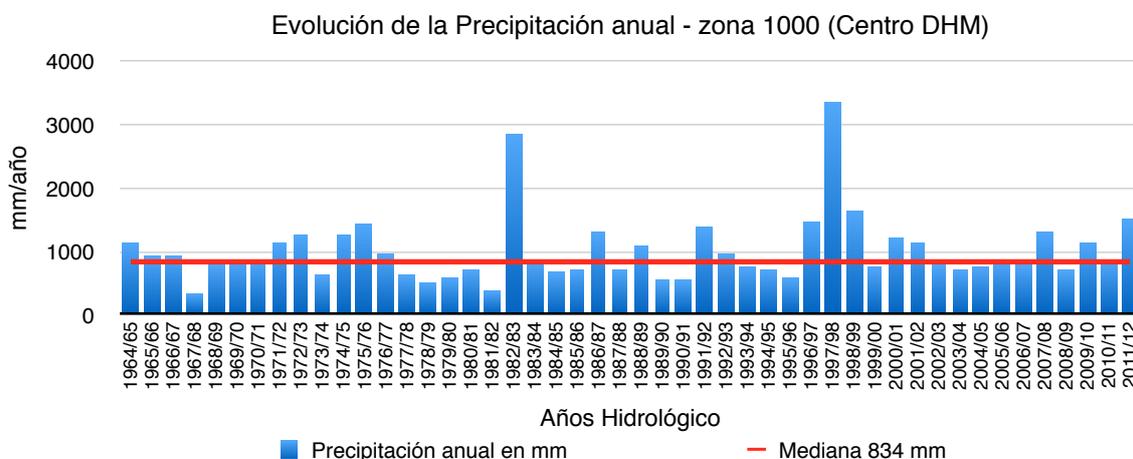


Figura 30: Evolución de la precipitación anual en la Zona Centro de la DHM.

Zona 1001

Los resultados de la cuenca del río Chone (1001) revelan que esta presenta diez ciclos secos, con un rango de duración de 1 a 5 igual al presentado en la Zona 1000. Los periodos más representativos fueron 1967/68-1970/71 (4 años), 1977/78-1981/82 (5 años) y 2002/03-2004/05 (5 años).

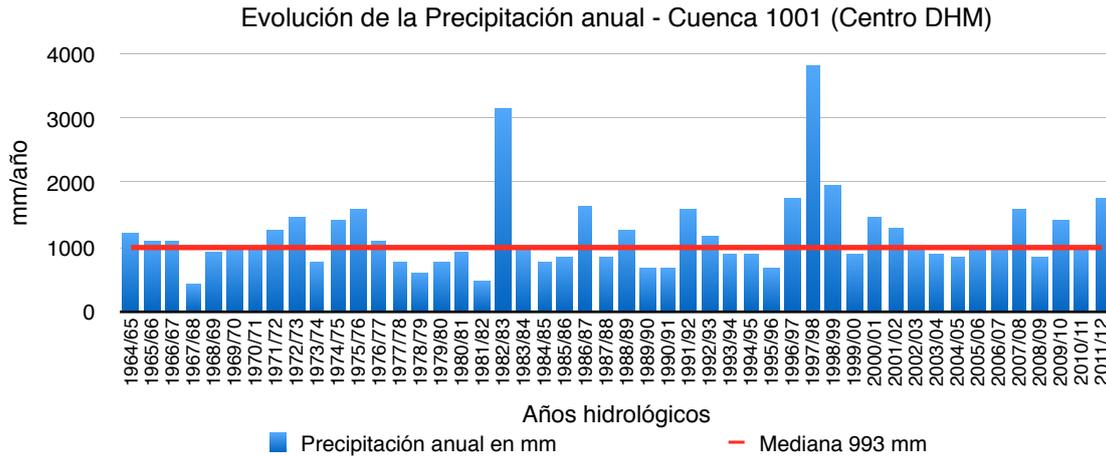


Figura 31: Evolución de la precipitación anual en la cuenca del río Chone de la DHM.

Zona 1002

La cuenca del río Portoviejo (1002) presenta las mismas condiciones que la cuenca del río Chone (1001), difiriendo solo en la duración del ciclo seco en el periodo 1967/68-1970/71 que registran únicamente dos años de permanencia.

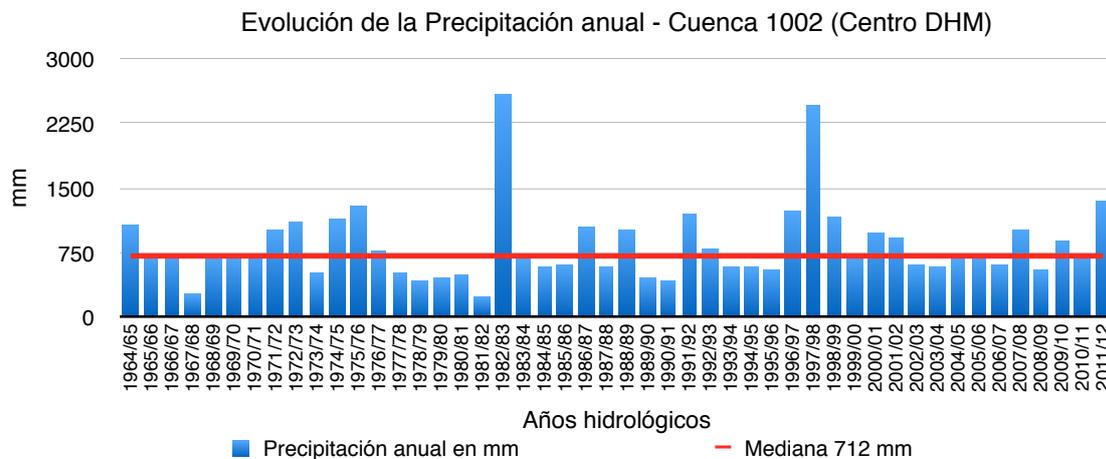


Figura 32: Evolución de la precipitación anual en la cuenca del río Portoviejo de la DHM.

Zona 2000

Esta zona refleja 10 ciclos secos, empezando estos en el periodo 1966/67-70/71 y culminando en 2008/09 con 5 y 1 meses de duración respectivamente, siendo este el rango de duración en que se manifiestan los eventos. Los periodos más representativo fueron 1966/67-70/71 y 1977/78-81/82 con una duración de 5 meses.

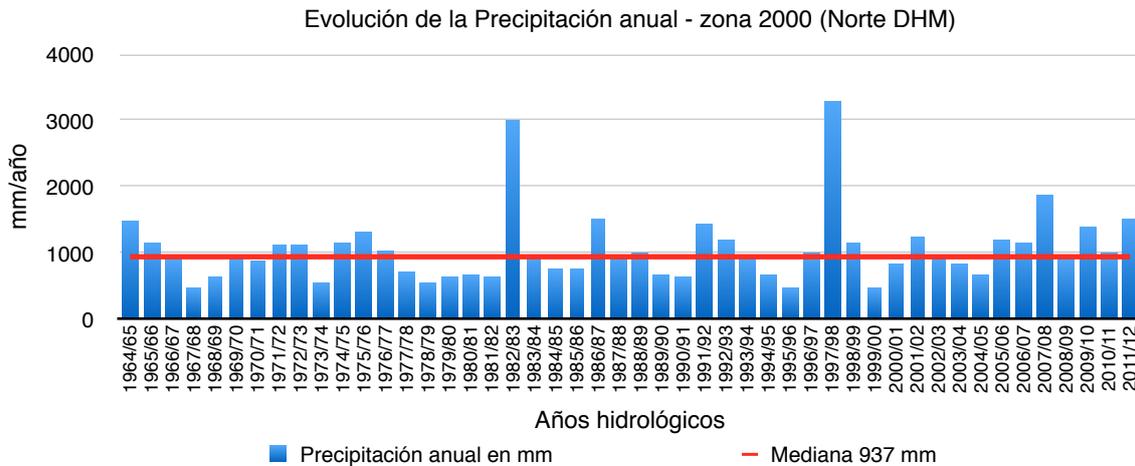


Figura 33: Evolución de la precipitación anual en la Zona Norte de la DHM.

Zona 3000

Al igual que en las zonas 1000 y 2000, basándose en los datos disponibles, el primer ciclo seco se registró en el periodo 1967/68-68/69. Sin embargo difiere de estas en el final del ciclo, ya que en esta zona el último evento seco se registró en el periodo 2010-2011. La duración de los eventos oscila de 1 a 6 meses. En esta zona el periodo más representativo fue 1976/77-81/82 con 6 meses de duración.

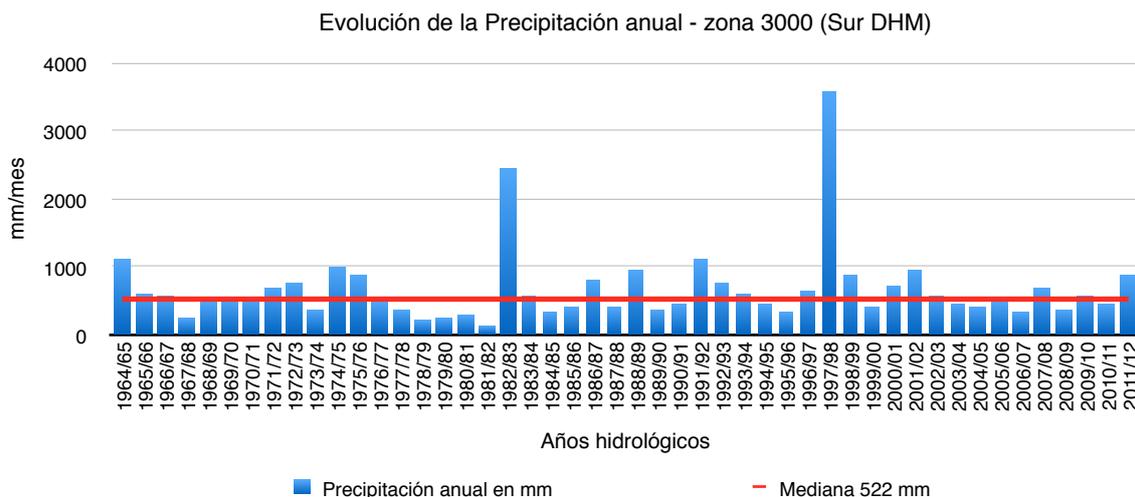


Figura 34: Evolución de la precipitación anual en la Zona Sur de la DHM.

5.2. Aplicación de índices

5.2.1. Índice de Precipitación Estandarizado (SPI)

Los resultados del SPI, fueron obtenidos mediante el software SPI_SL_6 creado por el National Drought Mitigation Center de la Universidad de Nebraska Lincoln. Se obtuvieron resultados de 3, 6, 12 y 24 meses para las Zona Norte (1000), Zona Centro (2000) y Zona Sur (3000).

SPI - 3 meses

El índice muestra que en año 1964, se presentó un descenso de precipitación equivalente a un evento de sequía moderada (valor SPI -1.00 a -1.5), sin embargo se recuperó alcanzando condiciones de humedad. En el año 1966 se observa el inicio de una sequía moderada que se extendió hasta 1968, alcanzando valores de sequía extrema en 1967 y 1968. Dicha sequía extrema solo se presentó en las zonas 1000 y 2000. Se aprecia una recuperación entre los años 1968 y 1969, y el índice vuelve a caer en 1970 pero se recupera rápidamente. El evento desaparece hasta el año 1973 donde se vuelve a presentar moderadamente, las condiciones se recuperan en 1974 no manifestándose hasta 1978 (sequía moderada). La sequía se extiende hasta el año 1981 en donde pasa a ser extrema (valor SPI < -2.00), estos eventos extremos solo se presentaron en la zona 1000. En el periodo 1982-1983 se presenta el fenómeno El Niño (incremento de precipitación), situación totalmente opuesta a la sequía ya que se alcanzan valores de SPI > 2.00 (Extremadamente húmedo).

El evento se vuelve a manifestar en el periodo 1985-1986 ausentándose en 1986 y apareciendo una vez más en 1987. En 1989 el índice llega a ser < -1 pero no alcanza la severidad. En 1994 se produce una sequía severa (- 1.5 a -2) solo en la zona 1000. En el periodo 1997-1998 aparece nuevamente El Niño, alcanzando un valor SPI por encima de 4. La sequía se vuelve a manifestar en 1999 extendiéndose hasta 2001; en este año la zona 2000 registró sequía severa, las condiciones secas se recuperaron en el 2002 no se presentó el evento hasta el 2004, mismo que culminó en el 2006 y no volvió a aparecer hasta el año 2009. El último evento se registró en el año 2011.

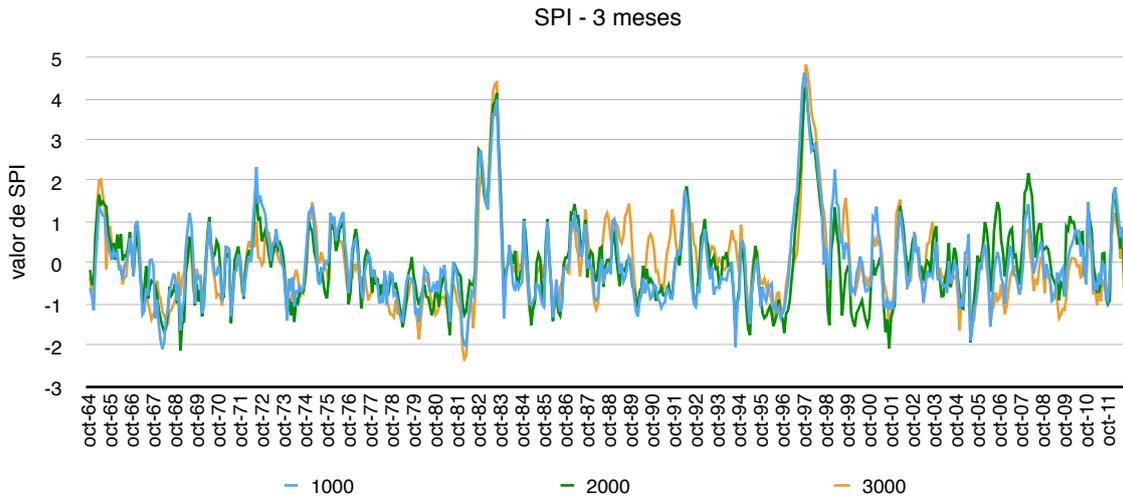


Figura 35: SPI de 3 meses para las tres zonas de la DHM.

SPI- 6 meses

El SPI de 6 meses refleja el inicio de una sequía en el año 1966 que se extiende hasta 1968; en las zonas 1000 y 2000 la sequía llegó a ser severa. En el periodo 1969-1971 se aprecia un aumento y disminución constante de la precipitación (por encima y debajo de la media, respectivamente). En el año 1973 las zonas 1000 y 2000 presentan una sequía moderada. Las condiciones secas se recuperan hasta el periodo 1978-1982, donde se observa un evento extremo en el año 1981 en las zonas 1000 y 3000. Al igual que en el SPI - 3 meses, se refleja el fenómeno El Niño en el periodo 1982-1983. En los años 1984 y 1985 el valor del índice es < -1 (sequía moderada), al igual que el periodo 1989-1991. Un nuevo evento se presenta entre los años 1994 y 1996, mismo que se recupera con la manifestación de El Niño. Después de este episodio (lluvias extremas), aparece un nuevo periodo seco, pero solo en la zona 2000, el cual se mantuvo hasta el año 2001. En el evento no vuelve a aparecer hasta el año 2004 y se extendió hasta el 2007, cabe indicar que dicho evento solo se manifestó en las zonas 1000 y 3000. La última sequía fue en el 2009 y se presentó solo en a zona 3000.

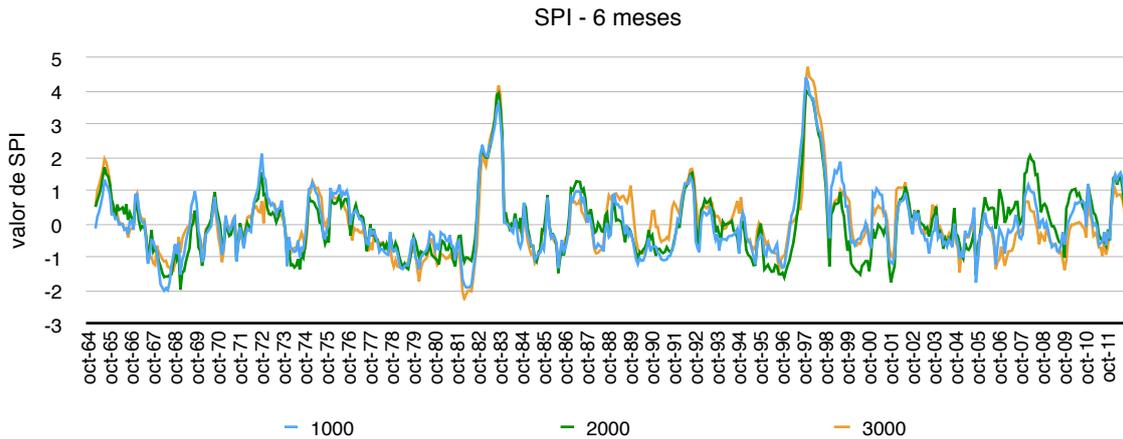


Figura 36: SPI de 6 meses para las tres zonas de la DHM.

SPI - 12 meses

El índice registra un evento de sequía en el periodo 1967-1968 dicho evento alcanzó la severidad en las zonas 1000 y 2000. En el periodo 1973-1974 vuelve a aparecer la sequía pero solo en la zona 2000. El evento se manifiesta una vez más en el año 1978 y se extiende hasta 1982, en las zonas 1000 y 3000 la sequía llega a ser severa. En el año 1986 se observa un episodio seco solo en las zonas 1000 y 2000. En el periodo 1989-1991 vuelve a aparecer la sequía aunque solo lo hace en la zona 1000. El siguiente evento se dio en el año 1995 en las zonas 1000 y 2000, dicho evento se extendió hasta el año 1996 pero únicamente en la zona 2000. Después del fenómeno El Niño (1997-1998) se produjo un evento severo en la zona 2000, este se mantuvo hasta el año 2000. En el 2004 la sequía se manifestó únicamente en la zona 1000, en el 2006 solo se presentó en la zona 3000 siendo este el último evento de sequía que refleja el índice.

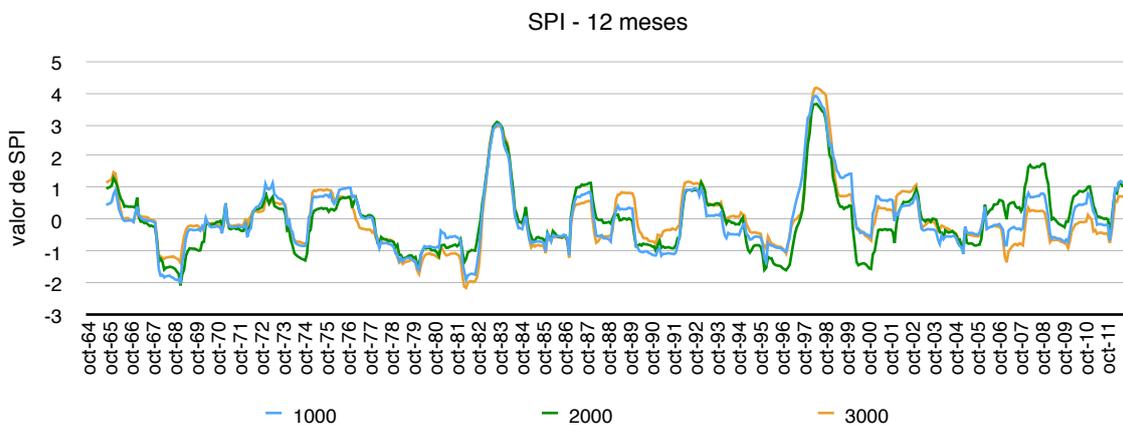


Figura 37: SPI de 12 meses para las tres zonas de la DHM.

SPI - 24 meses

El SPI de 24 meses refleja sequía en el periodo 1967-1969, alcanzando el extremo (< -2) en el año 1968. en la zona 1000. El siguiente evento de sequía fue severo y se manifestó en el periodo 1978-1982. En el año 1986 y en el periodo 1990-1991 se presentó una sequía moderada. El último evento se dio en el periodo 1995-1996 este fue severo.

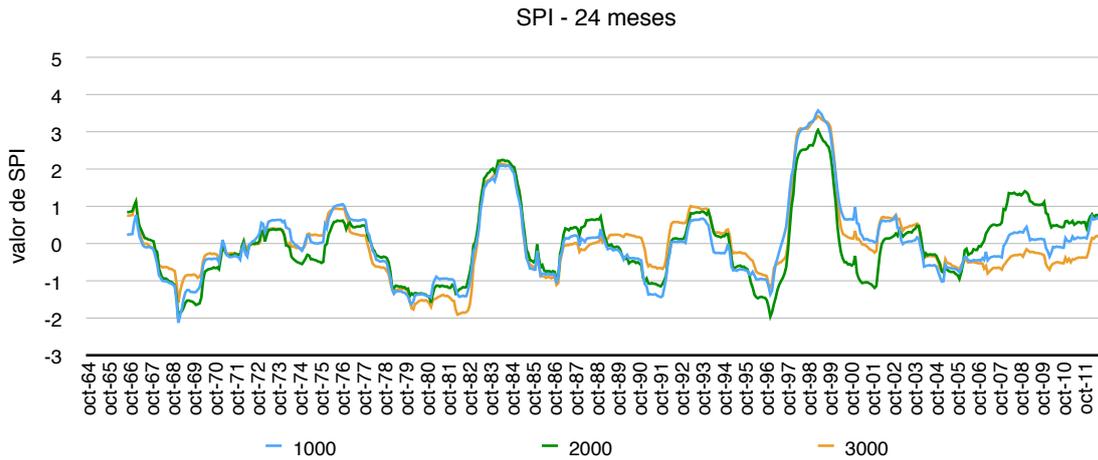


Figura 38: SPI de 24 meses para las tres zonas de la DHM.

Análisis de las escalas del SPI

Mediante la aplicación del Modelo Distribuido PATRICAL se generaron mapas de SPI de 3, 6, 12 y 24 meses; estos reflejan los eventos de sequía suscitados en la demarcación. A continuación se presenta un análisis de la sequía ocurrida en agosto de 1982, en las escalas antes mencionadas.

En la escala de 3 meses, el SPI identifica condiciones normales en la Zona Norte (2000) así como humedad moderada (1 a 1.5) en áreas puntuales; en contraste la Zona Centro (1000) presenta una sequía moderada (valor SPI -1 a -1.5), mientras que en la Zona Sur (3000) la sequía alcanza valores de severidad (-1.5 a -2) alcanzando el extremo (< -2).

Por su parte el SPI de 6 meses refleja que la zona 1000 y 2000 de la demarcación se encuentran en situación de normalidad, no así la zona 3000 que llega presentar sequía moderada llegando a condiciones severas.

El SPI de 12 y 24 meses muestra que la demarcación presenta eventos de sequía intensificándose estos de norte a sur. Así el SPI de 12 y 24 meses indica una sequía moderada en la zona 2000, sequía de moderada a severa en la zona 1000 y sequía de severa a extrema en la zona 3000.

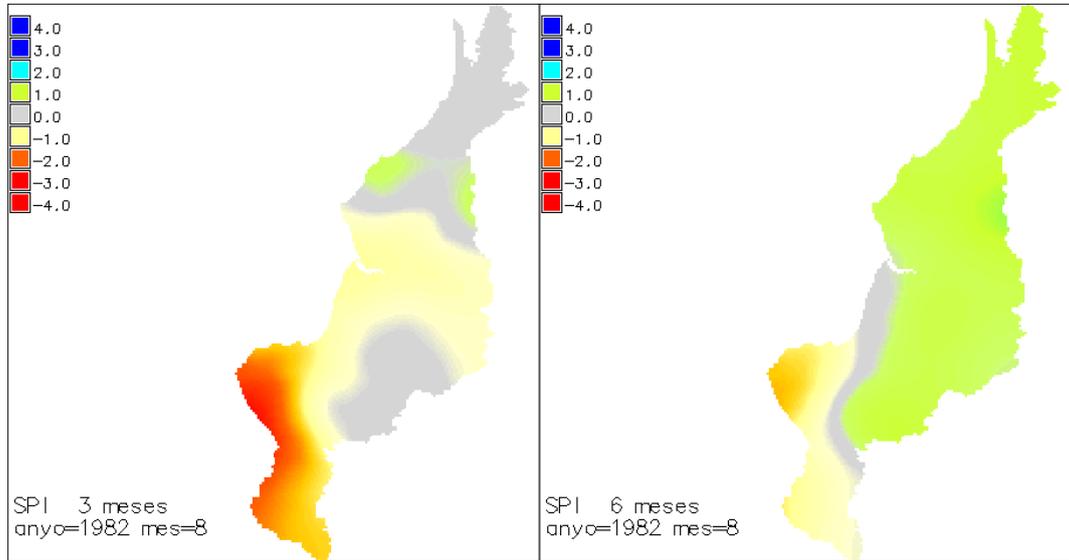


Figura 38: SPI gráfico de 3 y 6 meses de la DHM en agosto de 1982.

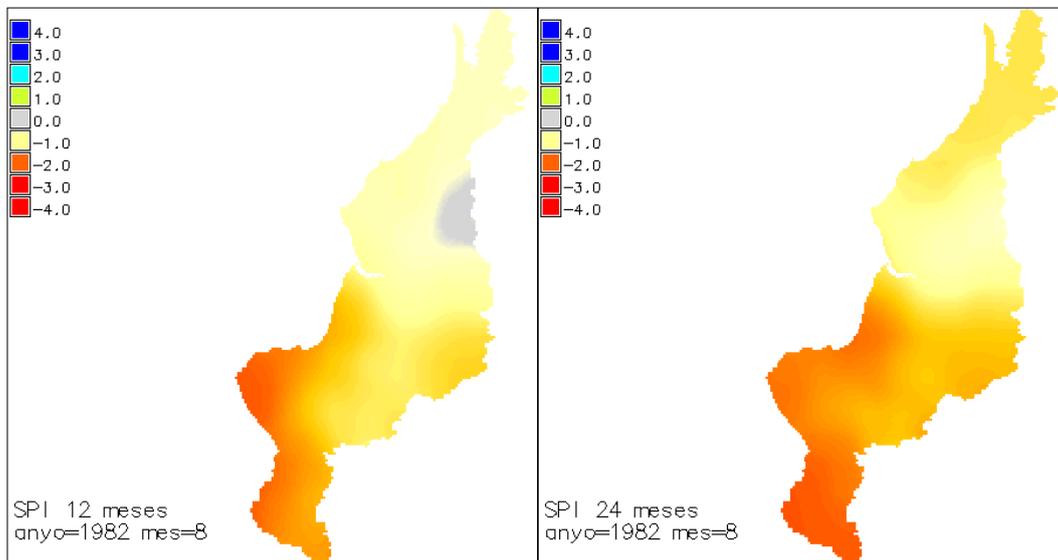


Figura 39: SPI gráfico de 12 y 24 meses de la DHM en agosto de 1982.

El uso de distintas escalas permite monitorear las condiciones de sequía a corto y largo plazo, en función de la acumulación de precipitación se puede identificar la afectación en las zonas de estudio.

5.2.2. Índice de Severidad de Sequía de Palmer (PDSI)

Para el cálculo del PDSI, se aplicó la versión planteada para el Modelo Hidrológico Agregado de Témex, a la cual se le realizó una modificación tomando en consideración la redefinición de la variable AWC que planteó Palmer. A continuación se muestran los eventos de sequía identificados con la versión del Modelo de Témex y los obtenidos con la modificación propuesta.

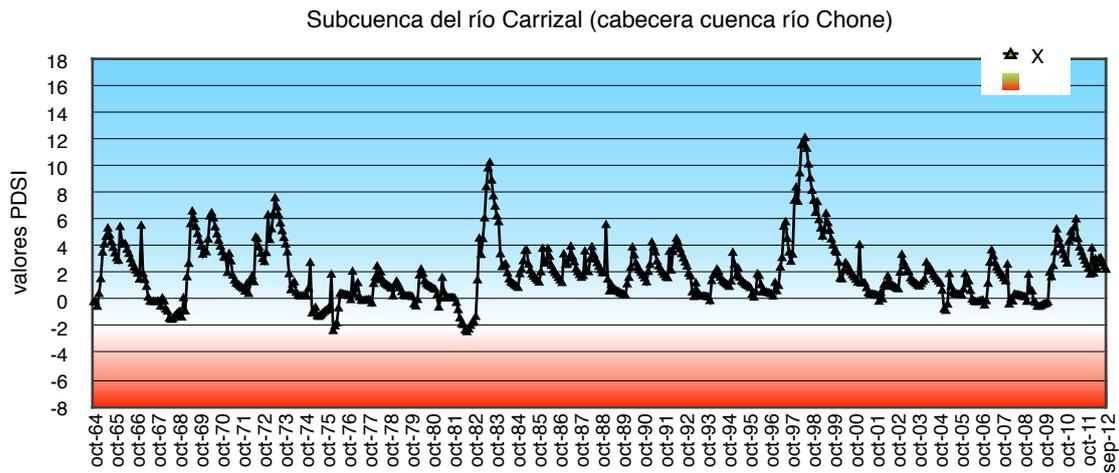


Figura 40: PDSI calculado con la formulación $PRO=Hi$ para la subcuenca de río Carrizal.

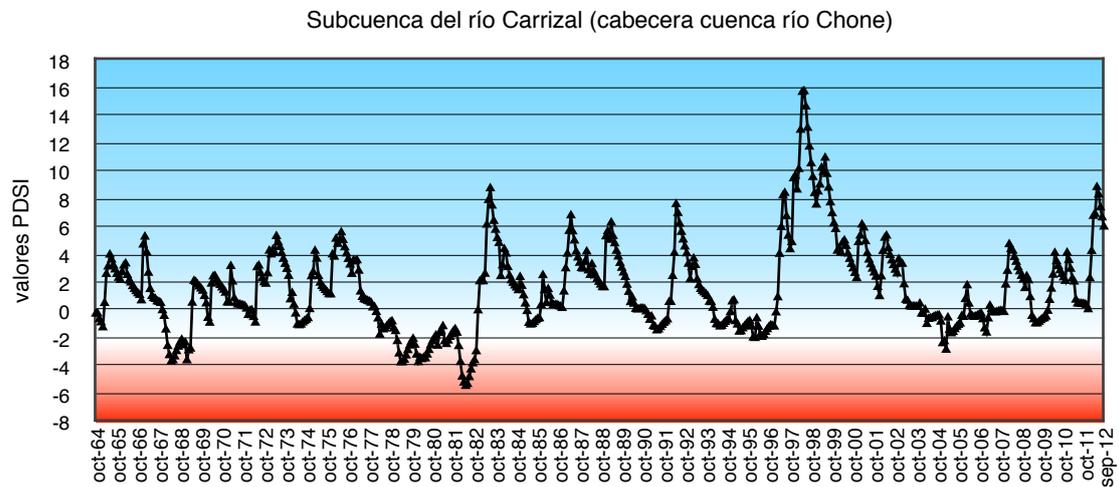


Figura 41: PDSI calculado con la formulación $PRO=3 \cdot P-PR$ para la subcuenca de río Carrizal.

Se aprecia claramente que con la formulación $PRO=Hi$ (planteada por Palmer) el PDSI refleja los eventos húmedos entre ellos el Fenómeno de El Niño en los periodos 1982-1983 y 1997-1998; sin embargo subestima los eventos de sequía. Con la

formulación propuesta PRO=3*P-PR (planteada por Palmer) se reflejan satisfactoriamente los episodios de sequía acontecidos en la demarcación.

Mientras el PDSI calculado con la versión del Modelo de Témez, representa condiciones de normalidad (valor PDSI 0.5 a -0.5) y de sequía reducida (valor PDSI -1 a -2) en el periodo 1967-1969, el PDSI calculado con la modificación propuesta representa una sequía moderada (valor PDSI -2 a -3) que llega a ser severa (valor PDSI -3 a -4). Otra sequía obviada por el PDSI con la formulación PRO=Hi, es la ocurrida en el periodo 1977-1982, el cual refleja condiciones ligeramente húmedas (valor PDSI 1 a 2) y posteriormente sequías severas en el periodo 1981-1982; mientras que el PDSI con la formulación PRO=3*P-PR, en este periodo indica una sequía reducida que gradualmente se convierte en extrema (valor PDSI 4 o menos).

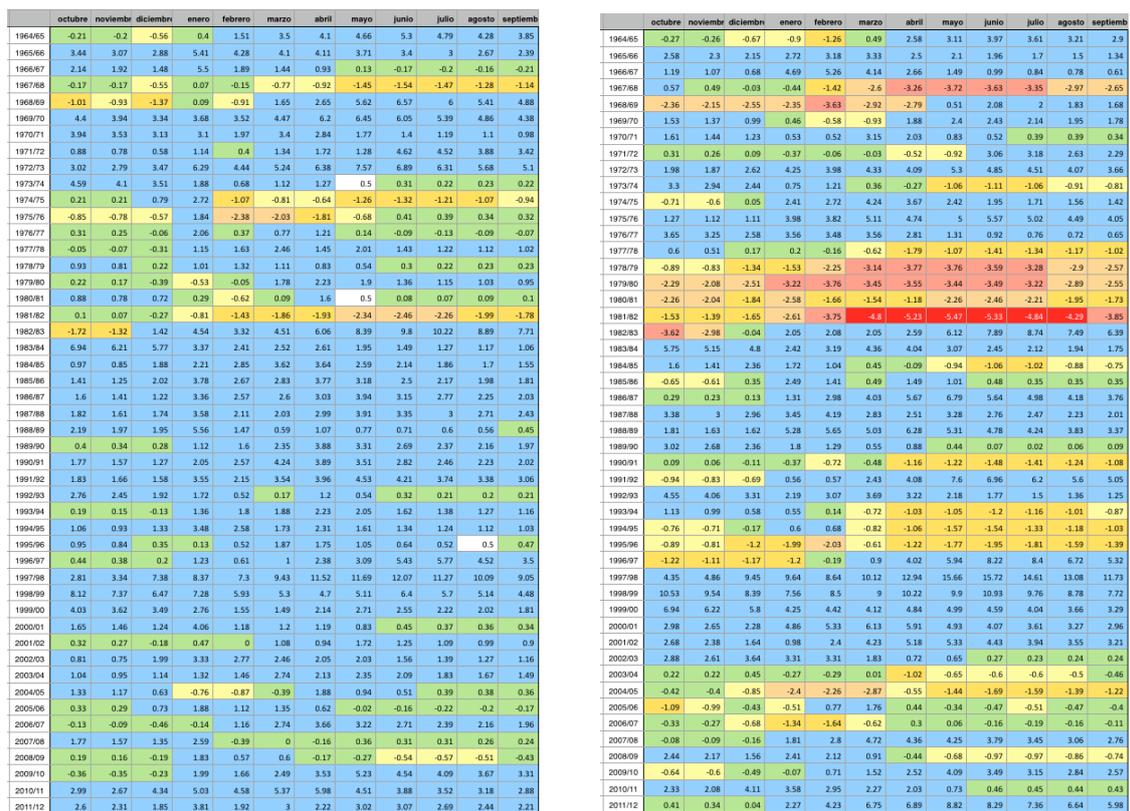


Figura 42: Diferencia entre representaciones de eventos según la formulación del cálculo del PDSI. (izquierda) PRO=Hi; (derecha) PRO= 3*P-PR.

Una vez establecida la modificación del cálculo se procedió a analizar los resultados obtenidos del PDSI (en las subcuencas de la Zona Centro) para identificar los eventos.

Zona 1001.01

El índice refleja una sequía reducida en el año 1964 que se recupera rápidamente. Un evento extremo (valor PDSI -4) se aprecia en el periodo 1967-1968. Mientras que en el periodo 1973-1974 se registró una sequía incipiente. En el año 1977 se inicia una sequía reducida (-1.0 a -2.0) que alcanza el extremo en el año 1981, dicha sequía se recupera con la manifestación del fenómeno El Niño. En el periodo 1984-1985 se origina una sequía reducida la cual se recupera hasta llegar al próximo evento (1989-1991). El mismo evento se manifiesta en el periodo 1993-1996. Entre los años 2003 se presenta una sequía incipiente que se convierte en moderada en el 2004, dicho evento se recupera en el año 2005 y se vuelve a presentar en el 2006. La última sequía (incipiente) se manifiesta en el año 2009.

Zona 1002.01

El PDSI de la subcuenca del río Chico, difiere del PDSI de la zona 1001.01, al reflejar este una sequía moderada en el año 1964. En el año 1967 se originó una sequía extrema (< -4) que se extendió hasta el año 1969. Al igual que en la zona 1001.01 entre los años 1973-1974 se produjo una sequía incipiente. En el periodo 1977-1982, se presentó un evento extremo que alcanzó valores PDSI de -8. Un nuevo evento de sequía incipiente se manifestó en los periodos 1984-1985 y 1985-1986. En el año 1989 se inicia una sequía reducida que alcanza el extremo. Un evento igual se presentó en el periodo 1993-1995 y en el año 1996. En el año 1997 se presentó una sequía moderada, este mismo escenario se presentó en el periodo 2002-2005 y en el año 2006. La última sequía registrada fue reducida y se presentó en el año 2009.

Zona 1002.02

En el año 1964 el índice refleja la misma sequía que se produjo en la zona 1002.01 (sequía moderada). Mientras que el periodo 1967-1968 se presentaron las mismas condiciones secas que la zona 1001.01 (sequía extrema). El periodo 1977-1982 también presentó un evento extremo, este alcanzó valores PDSI inferiores a -6. La sequía del periodo 1984-1986 presentó las mismas características de la zona 1002.01. En esta zona la sequía se manifestó en el

año 1990 a diferencia de la zona 1002.01 que inició en 1989. Mientras que el siguiente periodo seco, año 1993 y periodo 1994-1996 se asemeja al de la zona 1002.01 (se diferencia en la intensidad del evento), el último evento registrado es igual.

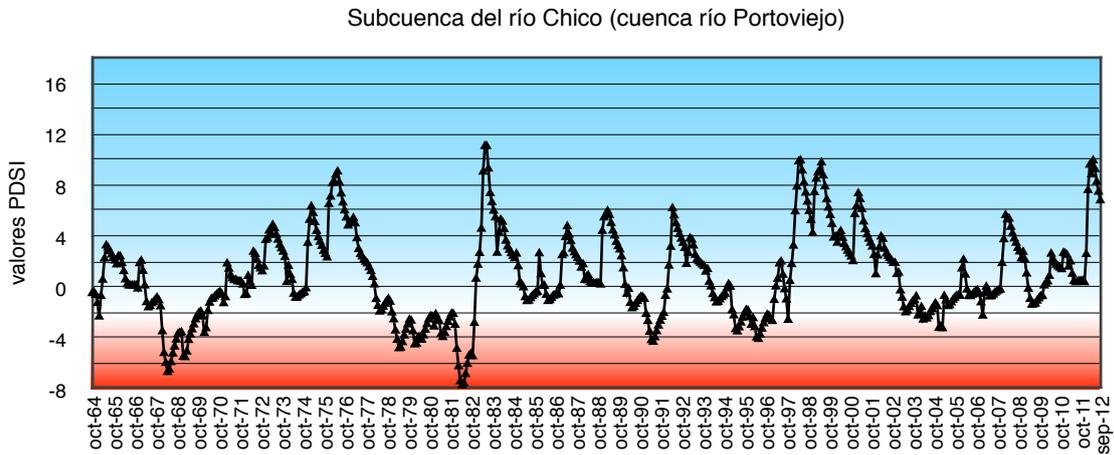


Figura 43: PDSI calculado para la subcuenca de río Chico (1002.01).

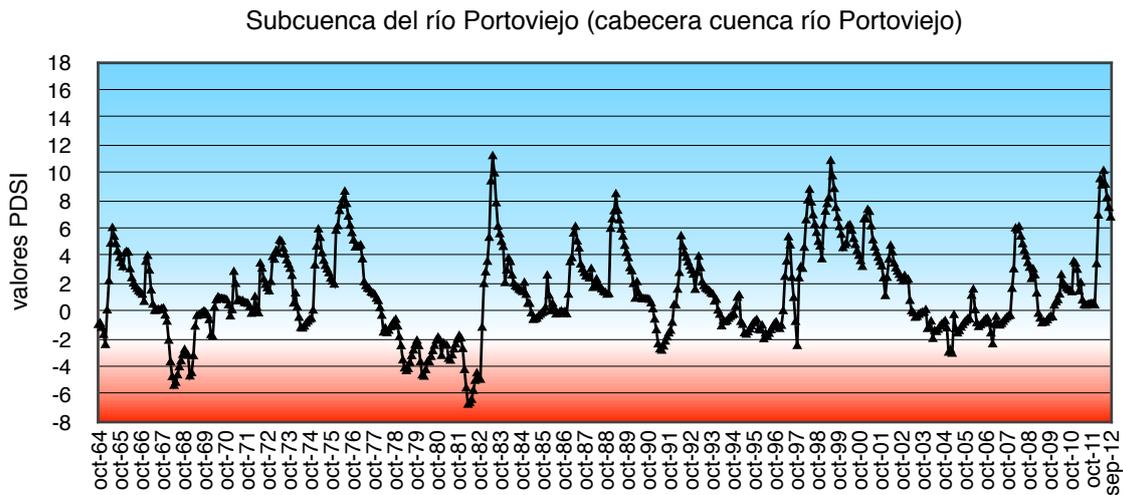


Figura 44: PDSI calculado para la subcuenca cabecera del río Portoviejo en la DHM (1002.02).

Índice de Estado (I.e)

El Índice de Estado se aplicó en la cuenca del río Chone ubicada en la Zona Centro de la demarcación, en el embalse La Esperanza. El cálculo del índice se realizó con los volúmenes históricos registrados (disponibles) en el periodo 2005-2012. Los resultados obtenidos indican que los volúmenes mínimos embalsados (I.e: 0.0) respecto al histórico, se presentaron en los años 2005, 2007 y 2010.

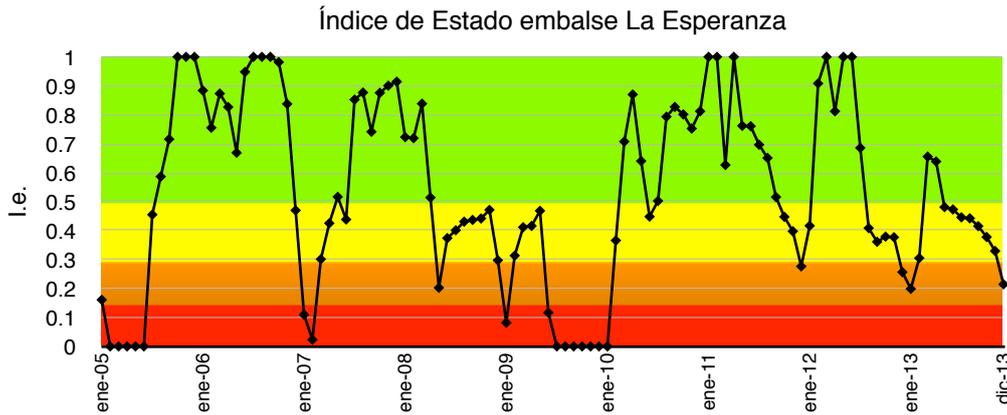


Figura 45: Índice de Estado para la cuenca del río Chone calculado con datos observados del embalse "La Esperanza".

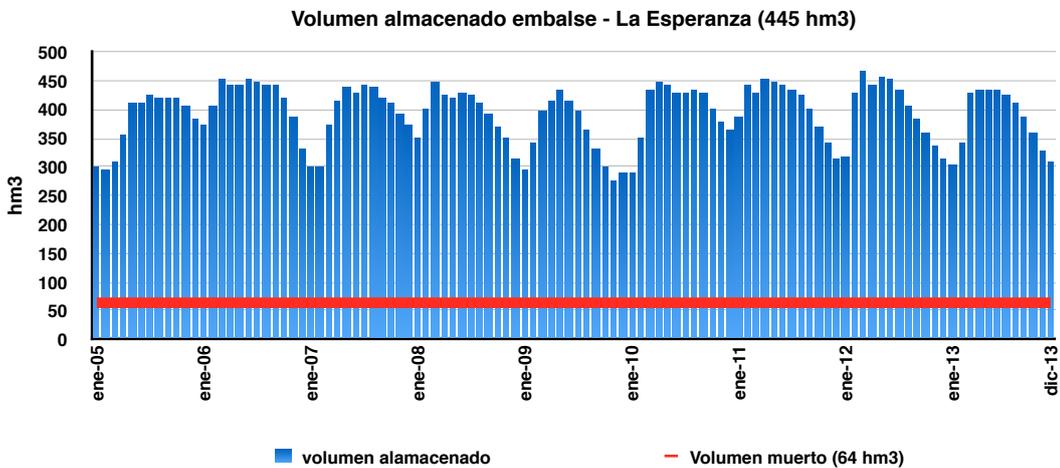


Figura 46: Volúmenes observados del embalse "La Esperanza".

El Índice de Estado hace referencia al volumen mínimo registrado históricamente, por lo tanto al observar que el embalse dispone de agua y el índice llega a 0.0 se establece que en el periodo 2005-2012, no se ha alcanzado el nivel mínimo de almacenamiento. Por esta razón se planteó simular el comportamiento del embalse en el periodo 1964-2012 mediante un modelo de gestión.

Los resultados demuestran que en el periodo 1981-1982 se hubiese registrado el volumen mínimo del embalse y en consecuencia los años 2005, 2007 y 2010, no serían considerados como Escenarios de emergencia (Nivel rojo, $v < 0.15$). El índice, difiere de los resultados del SPI y PDSI ya que estos reflejan eventos de sequía en el Zona Centro y el I.e., indica que el embalse La Esperanza (ubicado en la Zona Centro) dispone de agua para la satisfacción de

las demandas. Esto permite establecer que el I.e., no es un buen indicador para identificar las sequías en la Demarcación Hidrográfica de Manabí.

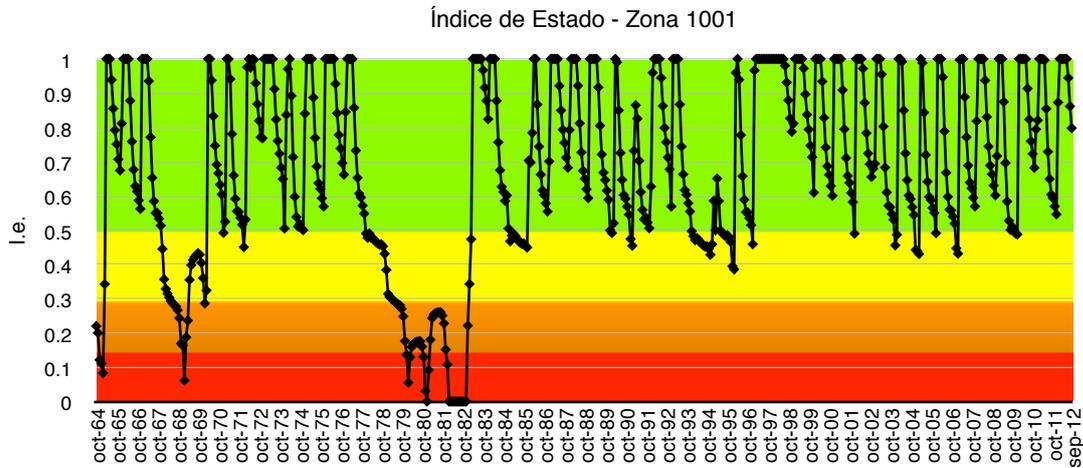


Figura 47: Índice de Estado para la cuenca del río Chone calculado con datos simulados del embalse "La Esperanza".

Análisis de Correlación cruzada: SPI vs PDSI

La correlación entre el Índice de Precipitación Estandarizado de 1, 3, 6, 12 y 24 meses y el Índice de Severidad de Sequía de Palmer, es 0.40, 0.58, 0.74, 0.87 y 0.84, respectivamente.

Estos resultados indican que el SPI de 1 mes y el PDSI tienen menor correlación que con las demás escalas, siendo la más favorable SPI 12 meses. Estableciendo entonces que ambos índices tienen comportamientos similares. Considerando por ello al SPI de 12 meses como buen indicador de la sequía agrícola.

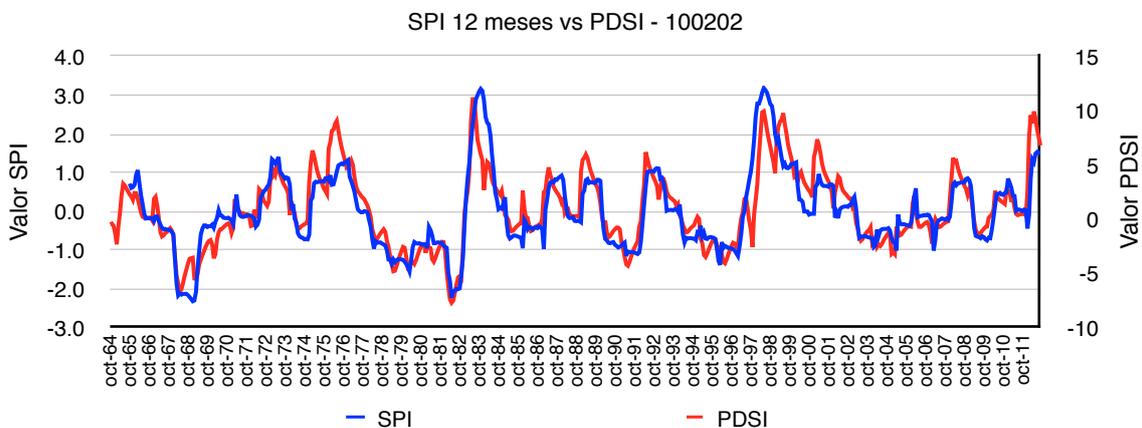
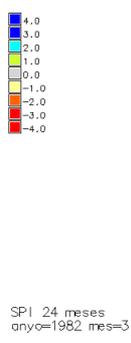


Figura 48: Contraste SPI con PDSI calculados en la subcuenca del río Chico en la DHM.

5.3. Validación de los resultados

En esta fase se validaron los resultados del SPI (representados en mapas) con los registros históricos de prensa que abordan el tema de la sequía en Manabí. Teniendo como resultados que el SPI refleja las sequías del ámbito de estudio.

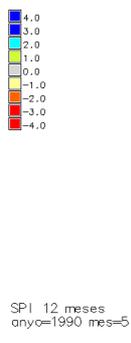


Marzo/1982

Afectaciones sector agropecuario

zona centro y zona sur.

Registros desde 02/1980 - 03/1982



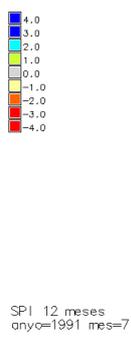
Mayo/1990

Afectaciones sector agropecuario

39.000 ha de cultivo, 200.000 ha de pasto

zona centro.

Registros desde 02/1990 - 04/1990

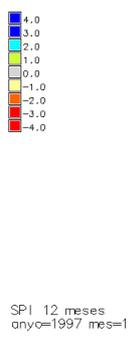


Julio/1991

Afectaciones sector agropecuario e industrial

zona centro.

Registros desde 01/1991 - 07/1991



enero/1997

Afectaciones sector agropecuario

450.000 Reces, 1.000 ha de café perdidas.

zona norte y centro.

Registros desde 01/1996 - 01/1997



Enero/2002

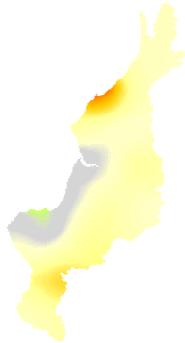
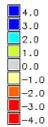
Afectaciones sector agropecuario

600 Reces perdidas.

zona norte.

Registros desde 11/2001 - 01/2002

SPI 24 meses
año=2002 mes=1



Julio/2005

Afectaciones sector agropecuario

10.000 ha de cultivos de ciclo corto (granos).

zona centro y sur.

Registros desde 04/2003 - 01/2004

SPI 24 meses
año=2005 mes=7



noviembre/2009

Afectaciones sector agropecuario

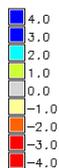
346.000 ha de pastos y cultivos (granos).

zona norte, centro y sur.

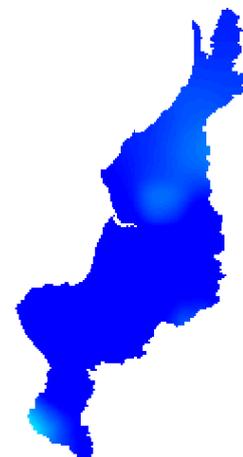
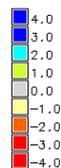
Registros desde 10/2009- 11/2009

SPI 12 meses
año=2009 mes=11

Fenómenos climáticos extremo "El Niño", Agosto/1983, Agosto/1998.



SPI 6 meses
año=1983 mes=8



SPI 6 meses
año=1998 mes=8

5.4. Contraste de los índices de sequía con los índices climáticos

Se efectuó el contraste entre el SPI (1, 3, 6, 12 y 24 meses) y los índices climáticos SOI y SST en la época húmeda (Diciembre - Mayo) y seca (Junio - Noviembre) en las zonas Norte, Centro y Sur. El análisis de la SST se realizó para las tres regiones El Niño (1+2, 3.4 y 4).

Zona de aplicación de SPI	Indicador ENSO	SPI 1 mes	SPI 3 meses	SPI 6 meses	SPI 12 meses	SPI 24 meses
Zona Norte Dic. - May. época húmeda	SOI	-0.14	-0.20	-0.20	-0.04	0.15
	Anm. SST 1+2	0.57	0.69	0.69	0.44	0.09
	Anm. SST 3.4	0.32	0.37	0.34	0.08	-0.25
	Anm. SST 4	0.08	0.08	0.05	-0.17	-0.45
Zona Norte Jun. - Nov. época seca	SOI	-0.17	-0.18	-0.12	0.07	0.15
	Anm. SST 1+2	0.67	0.67	0.52	0.38	0.07
	Anm. SST 3.4	0.31	0.21	0.03	-0.16	-0.40
	Anm. SST 4	0.12	0.03	-0.11	-0.24	-0.44
Zona Centro Dic. - May. época húmeda	SOI	-0.09	-0.15	-0.17	-0.01	0.16
	Anm. SST 1+2	0.60	0.72	0.73	0.49	0.17
	Anm. SST 3.4	0.26	0.31	0.29	0.03	-0.24
	Anm. SST 4	0.00	-0.02	-0.05	-0.24	-0.46
Zona Centro Jun. - Nov. época seca	SOI	-0.15	-0.16	-0.07	0.13	0.16
	Anm. SST 1+2	0.71	0.70	0.52	0.38	0.11
	Anm. SST 3.4	0.30	0.20	0.00	-0.18	-0.36
	Anm. SST 4	0.06	-0.03	-0.18	-0.29	-0.42
Zona Sur Dic. - May. época húmeda	SOI	-0.17	-0.20	-0.20	-0.07	0.08
	Anm. SST 1+2	0.66	0.76	0.73	0.48	0.13
	Anm. SST 3.4	0.33	0.36	0.32	0.09	-0.17
	Anm. SST 4	0.07	0.06	0.02	-0.14	-0.32
Zona Sur Jun - Nov. época seca	SOI	-0.07	-0.08	-0.03	0.11	0.13
	Anm. SST 1+2	0.47	0.47	0.39	0.33	0.05
	Anm. SST 3.4	0.06	-0.02	-0.12	-0.18	-0.36
	Anm. SST 4	-0.09	-0.14	-0.20	-0.22	-0.34

Tabla 8: Coeficientes de correlación entre el SPI 1, 3, 6, 12 y 24 meses con los indicadores ENSO. [SOI (mejor correlación -1) y las anomalías SST 1.2, SST 3.4, y SST 4 (mejor correlación 1)]. Celdas de relleno verde correlación mayor al 65 %.

Zona Norte

En la época seca, el SPI de 3, 6, 12 y 24 meses y el SOI no muestran correlaciones favorables. En cuanto a la SST, región 1+2 presenta mejores correlaciones con el SPI de 3 y 6 meses (0.69). Menos correlaciones se obtuvieron con la región 3.4 y prácticamente nulas con la región 4. Correlaciones similares se consiguieron en la época húmeda, sin embargo se lograron mejores correlaciones con la SST 1+2 y SPI de 1 y 3 meses (0.67).

Zona Centro

Al igual que en la época húmeda de la Zona Norte, se obtuvo poca o nula correlación entre el SOI y el SPI en todas sus escalas. Así mismo se aprecia la buena correlación entre la SST y SPI 3 (0.72) y 6 (0.73) meses. En la época seca, la Zona Centro refleja buena correlación entre el SPI de 1 (0.71) y 3 (0.70) meses y la SST región 1+2; mientras que en las regiones 3.4 y 4 se obtienen bajas y nulas correlaciones. Por ejemplo; el contraste entre el SPI de 6 meses y la SST 3.4 tiene correlación 0.0.

Zona Sur

En la época húmeda esta zona presenta correlaciones similares a las zonas anteriormente descritas. Así el contraste entre el SOI y el SPI (3, 6, 12 y 24) muestra baja correlación, similares resultados se tienen entre el SPI y la SST 3.4 y 4. Sin embargo la correlación entre el SPI y la SST 1+2 es favorable. El contraste entre el SPI de 1, 3 y 6 meses y la SST 1+2 presentó una correlación de 0.66, 0.76 y 0.73 respectivamente. El contraste realizado entre el SPI y los índices climáticos SOI y SST en la época seca de la Zona Sur, muestran el mismo escenario de correlación (baja y favorable) que las demás zonas anteriormente descritas, llegando incluso a alcanzar porcentajes de correlación menores. Así la correlación entre el SPI de 1, 3 y 6 meses y la SST región 1+2 es 0.47, 0.47 y 0.39 respectivamente.

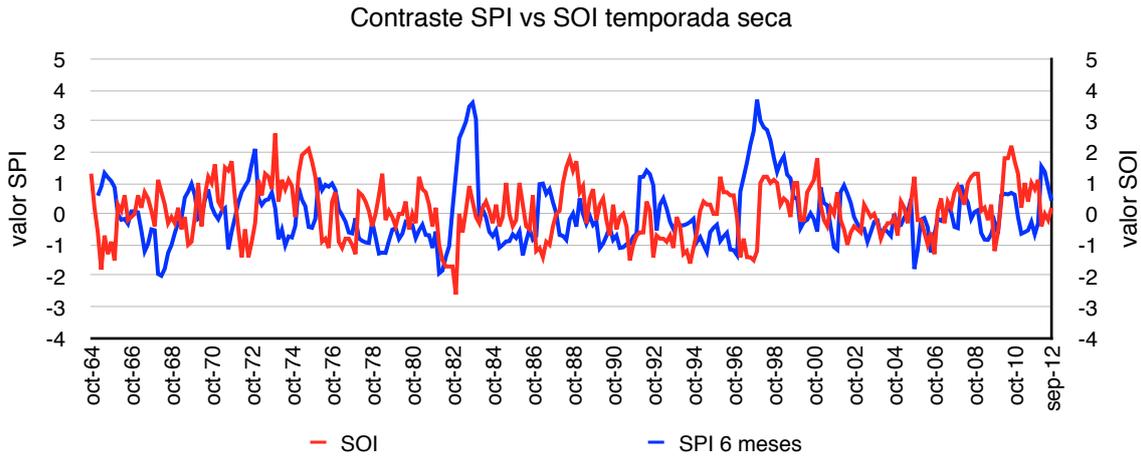


Figura 52: Contraste SPI con el SOI en la temporada seca calculados en la zona centro de la DHM.

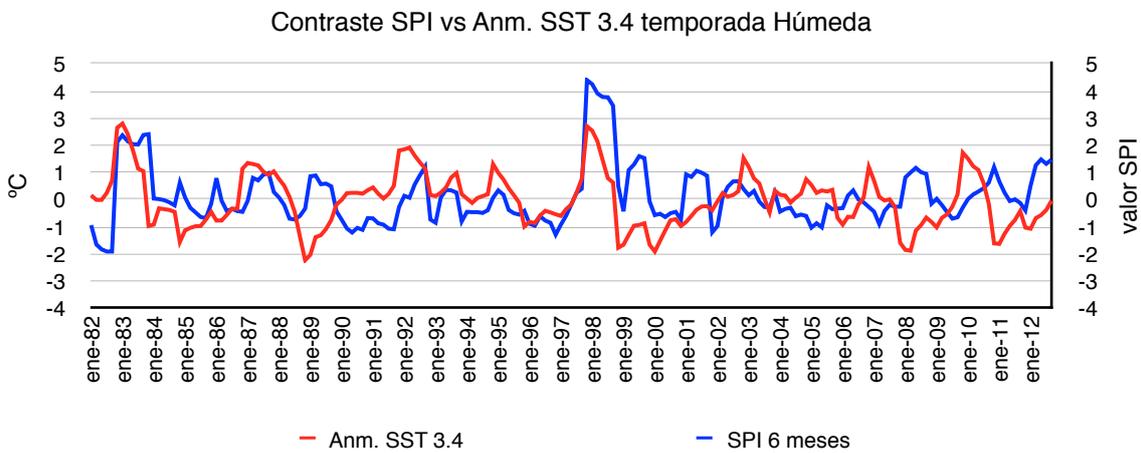


Figura 53: Contraste SPI con las anomalías SST 3.4 en la temporada húmeda calculados en la zona centro de la DHM.

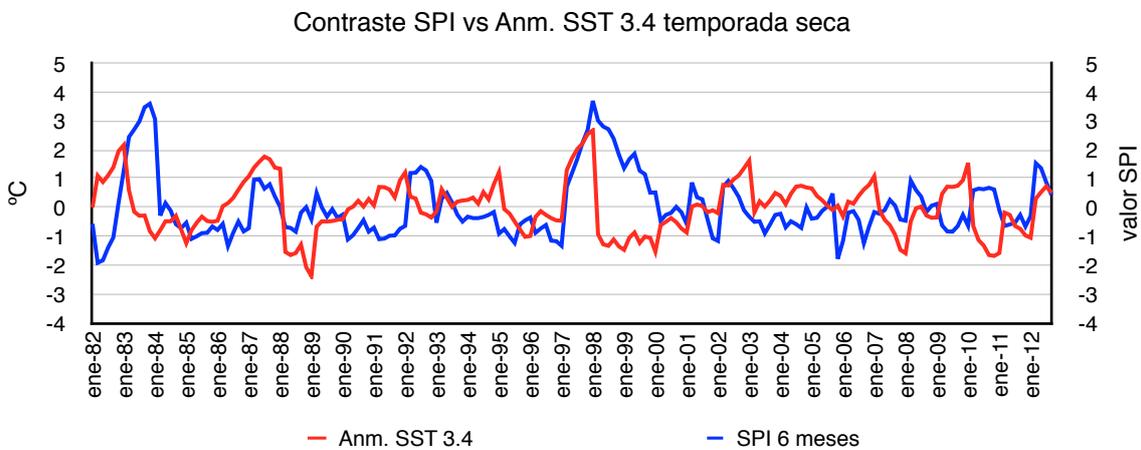


Figura 54: Contraste SPI con las anomalías SST 3.4 en la temporada seca calculados en la zona centro de la DHM.

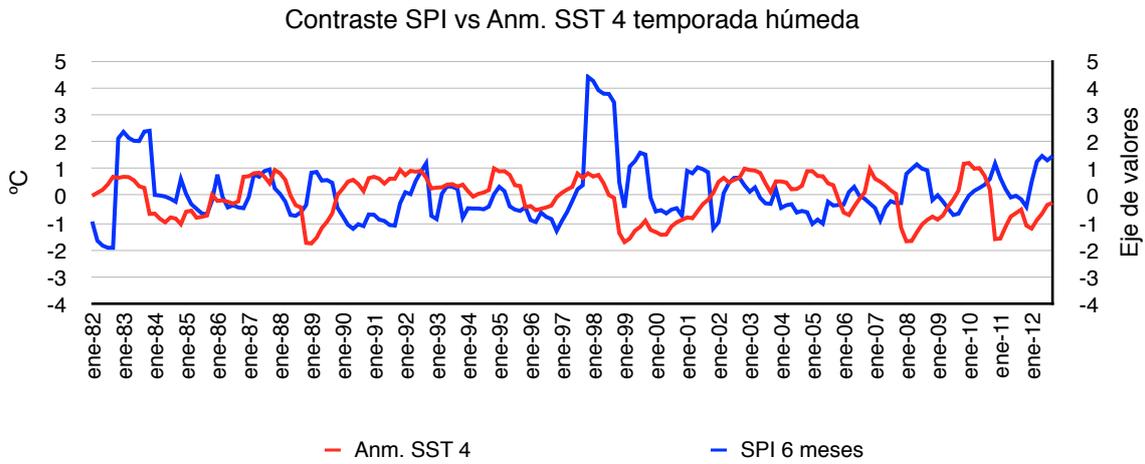


Figura 55: Contraste SPI con las anomalías SST 4 en la temporada húmeda calculados en la zona centro de la DHM.

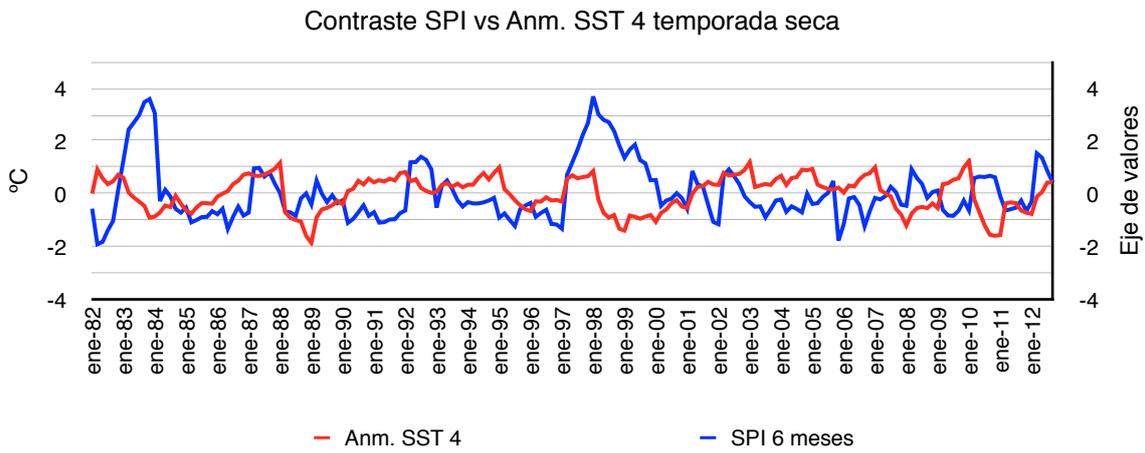


Figura 56: Contraste SPI con las anomalías SST 4 en la temporada seca calculados en la zona centro de la DHM.

6. CONCLUSIONES

El objetivo general de la presente investigación, es estudiar las posibilidades de implementar un sistema de indicadores para la gestión de sequías en la Demarcación Hidrográfica de Manabí. Para ello fue necesario caracterizar las condiciones climáticas y aplicar índices de sequía para reflejar los eventos del fenómeno.

El ámbito de estudio fue dividido en tres zonas denominadas: Zona Norte, Zona Centro y Zona Sur. La Zona Centro fue a su vez subdividida en dos cuencas (cuena del río Chone y cuena del río Portoviejo) y tres subcuencas (subcuena del río Carrizal, subcuena del río Chico y subcuena cabecera del río Portoviejo) hidrográficas. Dichas divisiones fueron codificadas para un mejor análisis de los resultados.

En la primera etapa de la investigación se analizaron las series de precipitación y temperatura generados por PATRICAL (periodo octubre/1964 - septiembre/2012); y se identificó que la precipitación y temperatura varían en función de las estaciones (lluviosa y seca). El análisis efectuado permite concluir que la temporada lluviosa se puede extender de 12 a 15 meses cuando se presenta el fenómeno de El Niño. En contraste cuando se presentan condiciones sequía este mismo periodo puede ser seco.

Los resultados obtenidos indican que la Zona Norte (2000) registra 10 ciclos secos, teniendo estos una duración desde 1 a 5 años. Los ciclos secos de mayor duración (5 años) se presentaron en los periodos 1966/67 -1970/71 y 1977/78-1981/82.

Los resultados de la Zona Centro (1000), subdividida en dos cuencas y tres subcuencas hidrográficas, revelan que: La cuena del río Chone (1001) presenta diez ciclos secos, con un rango de duración de 1 a 5 años. Los periodos más representativos fueron 1967/68 - 1970/71 (4 años), 1977/78 - 1981/82 (5 años) y 2002/03 - 2004/05 (5 años). La cuena del río Portoviejo (1002) presenta las mismas condiciones que la cuena del río Chone, difiriendo solo en la duración del ciclo seco en el periodo 1967/68 – 1970/71 que registran únicamente dos años de permanencia.

La Zona Sur (3000) al igual que en las zonas 1000 y 2000, el primer ciclo seco se registró en el periodo 1967/68-68/69. Sin embargo difiere de estas en el final del ciclo, ya que en esta zona el último evento seco se registró en el periodo 2010-2011. La duración de los eventos oscila de 1 a 6 meses.

Se concluye por tanto que en la demarcación los eventos secos se han presentado en los mismos periodos y con duraciones similares

En la segunda etapa del estudio se aplicaron los índices seleccionados (Standardized precipitation Index, (*McKee, et al.*) Palmer Drought Severity Index (*Palmer 1965*) e Índice de Estado (*CHJ, 2000*)). Los resultados de la aplicación del SPI indican que el mayor evento de sequía en la demarcación se presentó en el periodo 1977/78-1981/82, produciéndose este en el año 1982. Iguales resultados refleja el PDSI.

El SPI reflejó la sequía en las zonas de estudio antes que el PDSI. Esto se debe a que el SPI es un índice de sequía meteorológica basado únicamente en registros de precipitación y por tanto el aumento o disminución de esta se verá reflejada en los resultados. En cuanto a los valores extremos hay que considerar que la escala del PDSI es más amplia que la del SPI. Así cuando el SPI indique sequía extrema ($< - 2$) el PDSI recién alcanza esa clase cuando presente un valor $< - 4$. Considerando que en la provincia de Manabí, el sector más afectado por la sequía es el agropecuario, se concluye que el PDSI es un indicador útil para monitorear el evento.

En cuanto a la aplicación del Índice de Estado en el embalse La Esperanza de la Zona Centro de la demarcación, los registros indican que los volúmenes mínimos embalsados (l.e: 0.0) respecto al histórico, se presentaron en los años 2005, 2007 y 2010. Sin embargo estos valores mínimos no han alcanzado el volumen útil del embalse. Esto indica que el embalse dispone de agua para la satisfacción de las demandas. Razón por la cual se optó por simular el comportamiento histórico del embalse mediante un modelo de gestión. Los resultados demuestran que en el periodo 1981-1982 se hubiese registrado el volumen mínimo del embalse. Por lo tanto se concluye que el l.e., no es un buen indicador de sequía para la DHM.



Los resultados de la validación (contraste de mapas de SPI y registros históricos de prensa que abordan el tema de la sequía en Manabí, indican que dicho índice refleja las sequías presentadas en el ámbito de estudio. También se estableció (mediante correlación cruzada) que el SPI de 12 meses y el PDSI mensual tienen comportamientos similares. Por todo lo expuesto se concluye que el SPI y el PDSI se pueden implementar como indicadores para la gestión de la sequía en la Demarcación Hidrográfica de Manabí.

En la tercera etapa se contrastaron los resultados del SPI (3, 6, 12 y 24 meses) y los índices climáticos SOI y SST (región 1+2, 3.4 y 4) en las épocas lluviosas y secas, para establecer la relación entre estos y los eventos ENSO. Los resultados indican una correlación baja entre el SPI y el SOI, todo lo contrario sucede con la SST en la región 1+2 (costas de Perú y Ecuador) ya que se obtiene una correlación superior al 65%. Se concluye por tanto que el SOI no es un buen indicador de la sequía en la Demarcación Hidrográfica de Manabí, y se establece la SST 1+2 como un indicador de eventos ENSO en la demarcación.

7. LÍNEAS DE INVESTIGACIÓN

Una vez culminada la investigación y en base a los resultados obtenidos se considera relevante plantear nuevas líneas de investigación que aporten al tema de estudio. Así las líneas propuestas son:

- Considerando que la formulación de PDSI que planteó Palmer en 1965 se basa en las características climáticas de áreas específicas y que a su vez asumió que estas serían iguales para cualquier zona, se propone aplicar la Auto-calibración del Índice de Severidad de Sequía de Palmer (Self-Calibrating Palmer Drought Severity Index, SC-PDSI), para obtener valores de PDSI que reflejen las características climáticas del área de estudio.
- Aplicar nuevos índices que contribuyan a la detección de las sequías, por ejemplo el Índice de Vegetación Diferencial Normalizado (NDVI) y el Índice de Salud de la vegetación (VHI); estos son considerados como indicadores auxiliares para el seguimiento de la sequía, ya que reflejan el estado de la vegetación.

8. REFERENCIAS

- Agnew, C. (2000). "Using the SPI to identify drought."
- Alder, F. (2006). "Los Embalses y los Recursos Hídricos Superficiales."
- Alley, W. M. (1984). "The Palmer drought severity index: limitations and assumptions." Journal of climate and applied meteorology **23**(7): 1100-1109.
- AMS (2004). "Statement on meteorological drought." Bull. Amer. Meteor. Soc **85**: 771-773.
- Barlow, M., et al. (2002). "Drought in central and southwest Asia: La Niña, the warm pool, and Indian Ocean precipitation." Journal of Climate **15**(7): 697-700.
- Bordi, I. and A. Sutera (2001). "Fifty years of precipitation: some spatially remote teleconnections." Water resources management **15**(4): 247-280.
- Bruce, J. P. (1994). "Natural disaster reduction and global change." Bulletin of the American Meteorological Society **75**(10): 1831-1835.
- Carrillo, J. s. (1999). "Agroclimatología." Editorial Innovación Tecnológica. Universidad Central de Venezuela, Caracas.: 213-246.
- Carvajal, J., et al. (2010). "Sistematización de prácticas para el aprovechamiento de recursos naturales en la cuenca del Chone. TCP/RLA/3112. TCP/RLA/3217. Asistencia a los países andinos en la reducción de riesgos y desastres en el sector agropecuario."
- Chiew, F. H., et al. (1998). "El Nino/Southern Oscillation and Australian rainfall, streamflow and drought: Links and potential for forecasting." Journal of Hydrology **204**(1): 138-149.
- CHJ (2007). "Confederación Hidrográfica del Júcar. Plan Especial de Alerta y Eventual Sequía en la Confederación Hidrográfica del Júcar."
- D'Ercole, R. and M. Trujillo (2003). Amenazas, vulnerabilidad, capacidades y riesgo en el Ecuador: Los desastres, un reto para el desarrollo, Cooperazione Internazionale (COOPI); Institut de Recherche pour le Développement (IRD); OXFAM GB.

- Edwards, D. and T. McKee (1997). Characteristics of twentieth century drought in the United States at multiple time scales, Fort Collins, Colo., Colorado State University, Department of Atmospheric Sciences (Climatology Report Number 97-2).
- Estrela, T. (2006). "La gestión de las sequías en España." INGENIERÍA Y TERRITORIO 74: 52.
- FAO (1983). "Guidelines: Land evaluation for Rainfed Agriculture. ." Soils Bulletin(52).
- Fernández, B. (1997). "Identificación y caracterización de sequías hidrológicas en Chile central." Ingeniería del agua 4(4).
- Gibbs, W. J. and J. V. Maher (1967). "Rainfall deciles as drought indicators." Bureau of Meteorology Bull. 48.
- Gommes, R. and F. Petrassi (1994). "Rainfall variability and drought in Sub-Saharan Africa since 1960." FAO Agrometeorology Series Working Paper (FAO). no. 9.
- Goudie, A. (1985). The encyclopedic dictionary of physical geography, Blackwell. Oxford, Reino Unido.
- Gumbel, E. (1963). "Statistical forecast of droughts." Hydrological Sciences Journal 8(1): 5-23
- Hewitt, K. (1997). Regions of risk: A geographical introduction to disasters, Longman London.
- Hoerling, M. and A. Kumar (2003). "The perfect ocean for drought." Science 299(5607): 691-694.
- Hudson, H. and R. Hazen (1964). "Droughts and low streamflow." Handbook of applied hydrology.
- ICID (1998). How to work out a drought mitigation strategy, DVWK. Guidelines 309/1998. International Commission on Irrigation and Drainage (ICID).

- Jiménez, R. (2008). "Aspectos biológicos de El Niño en el Océano Pacífico Ecuatorial." Edición de la Universidad de Guayaquil. Facultad de Ciencias Naturales–Centro de Biodiversidad CENBIO. Guayaquil–Ecuador.
- Keetch, J. J. and G. M. Byram (1968). "A drought index for forest fire control. Southeastern Forest Experiment Station, Asheville, NC ".
- Kiladis, G. N. and H. F. Diaz (1989). "Global climatic anomalies associated with extremes in the Southern Oscillation." Journal of Climate **2**(9): 1069-1090.
- Kogan, F. (1995). "Application of vegetation index and brightness temperature for drought detection." Advances in Space Research **15**(11): 91-100.
- Krishnan, A. (1979). Definition of droughts and factors relevant to specification of agricultural and hydrological droughts. Memories in CD-ROM of Symposium on hydrological aspects of droughts, Nueva Delhi, India.
- Kulik, M. (1962). "Agroclimatic indices of drought." Compendium of abridged reports to the Second Session of CagM (WMO). Hydrometeorological Publishing. Moscú: 75-81.
- Lawrimore, J., et al. (2002). "Beginning a new era of drought monitoring across North America." Bulletin of the American Meteorological Society **83**(8): 1191-1192.
- Le Comte, D. (1994). "Highlights Around the World." Weatherwise **47**(1): 23-26.
- Le Comte, D. (1995). "Highlights around the World." Weatherwise **48**(1): 20-22.
- Linsely Jr., R. K., et al. (1959). Applied hydrology, McGraw Hill New York.
- MAE and PNUD (2009). "Proyecto Adaptación al Cambio Climático a través de una Efectiva Gobernabilidad del Agua en el Ecuador (PACC)."
- McKee, T. B., et al. (1993). The relationship of drought frequency and duration to time scales. Proceedings of the 8th Conference on Applied Climatology, American Meteorological Society Boston, MA.
- Méndez, M. and V. Magaña (2010). "Regional Aspects of Meteorological Droughts over Mexico and Central America." American Meteorological Society **23**: 1175-1178.

- Mishra, A. K. and V. P. Singh (2010). "A review of drought concepts." Journal of Hydrology **391**(1): 202-216.
- NCDC (2013). "National Climatic Data Center. "The Palmer Drought Indices"."
- NOAA-STAR "National Oceanic and Atmospheric Administration's Center for Satellite Applications and Research ".
- Obasi, G. (1994). "WMO's role in the international decade for natural disaster reduction." Bulletin of the American Meteorological Society **75**(9): 1655-1661.
- Olcina, J. (1994). "Riesgos climáticos en la Península Ibérica." Acción Divulgativa SL, Madrid **440**.
- Oviedo Torres, B. L. (2011). "Caracterización de Fenómenos Meteorológicos." Universidad Nacional Abierta y a Distancia - UNAD, Bogotá - Colombia.
- Palmer, W. C. (1965). Meteorological drought, US Department of Commerce, Weather Bureau Washington, DC, USA.
- Palmer, W. C. (1968). "Keeping track of crop moisture conditions, nationwide: The new crop moisture index."
- Panu, U. and T. Sharma (2002). "Challenges in drought research: some perspectives and future directions." Hydrological Sciences Journal **47**(S1): S19-S30.
- Piechota, T. C. and J. A. Dracup (1996). "Drought and Regional Hydrologic Variation in the United States: Associations with the El Niño-Southern Oscillation." Water Resources Research **32**(5): 1359-1373.
- Quinn, W. H. and V. T. Neal (1992). "The historical record of El Niño events." Climate since AD 1500: 623-648.
- Quiroz, M. C. (2011). "Anexo del Informe Técnico: Elaboración de un boletín con información hidroclimática de los mares de México."
- Ramdas, D. (1960). "Crops and weather in India." Indian Council of Agricultural Research Nueva Delhi, India.: 130.

- Riebsame, W. E., et al. (1991). Drought and natural resources management in the United States. Impacts and implications of the 1987-89 drought, Westview Press Inc.
- Rind, D., et al. (1990). "Potential evapotranspiration and the likelihood of future drought." Journal of Geophysical Research. **95**(D7): 9983-10004.
- Rivadeneira, J. F. (2014). "Evaluación del efecto del cambio climático bajo escenarios de emisiones SRES y RCP en la demarcación hidrográfica de Manabí - Ecuador."
- Ropelewski, C. F. and M. S. Halpert (1987). "Global and regional scale precipitation patterns associated with the El Niño/Southern Oscillation." Monthly Weather Review **115**(8): 1606-1626.
- Ropelewski, C. F. and M. S. Halpert (1996). "Quantifying southern oscillation-precipitation relationships." Journal of Climate **9**(5): 1043-1059.
- Rouse Jr, J., et al. (1973). "Monitoring vegetation systems in the Great Plains with ERTS." NASA special publication **351**: 309.
- Russell, C. S., et al. (1970). "Drought and water supply." Johns Hopkins University Press. Baltimore (EEUU): 232.
- Schneider, S. H. E. (1996). Encyclopedia of climate and weather, Oxford University Press, New York.
- SENAGUA (2010). "Informe de Gestión 2008 - 2010. UNA GESTIÓN DIFERENTE DE LOS RECURSOS HÍDRICOS."
- Shafer, B. and L. Dezman (1982). Development of a Surface Water Supply Index (SWSI) to assess the severity of drought conditions in snowpack runoff areas. Proceedings of the Western Snow Conference.
- Shin, H.-S. and J. D. Salas (2000). "Regional drought analysis based on neural networks." Journal of Hydrologic Engineering **5**(2): 145-155.
- Subrahmanyam, V. P. (1967). Incidence and spread of continental drought. WMO report, WMO.

- SUDENE (1981). "As secas do Nordeste: uma abordagem histórica de causas e efeitos." Recife: 82 +38 mapas.
- SUDENE (1999). "'O fenômeno das secas'." [En línea]. Disponible en: <http://www.sudene.gov.br/nordeste/Seca.html>. [Consulta, 14 de enero de 2000].
- Svoboda, M. (2000). "An introduction to the Drought Monitor." Drought Network News **12**: 15–20.
- Tutasi, P., et al. (2011). "Epipelagic copepod distributions in the eastern equatorial Pacific during the weak La Niña event of 2001." Scientia Marina **75**(4): 791-802.
- United Nations Secretariat General (1994). "United Nations convention to combat drought and desertification in countries experiencing serious droughts and/or desertification, particularly in Africa." Particularly in Africa, Paris.
- Valiente, Ó. M. (2001). "Sequía: definiciones, tipologías y métodos de cuantificación." Investigaciones geográficas, nº 26, 2001; pp. 59-80.
- Van Rooy, M. (1965). "A rainfall anomaly index independent of time and space." Notos **14**: 43-48.
- Villalobos, A. (2006). Análisis y seguimiento de distintos tipos de sequía en la cuenca del río Júcar, Tesis doctoral. Universidad Politécnica de Valencia. Valencia.
- Weghorst, K. (1996). The reclamation drought index: Guidelines and practical applications. North American Water and Environment Congress & Destructive Water, ASCE.
- Wells, N., et al. (2004). "A self-calibrating Palmer drought severity index." Journal of Climate **17**(12): 2335-2351.
- WFP (2011). "World Food Programme. Building Resilience: Bridging Food Security, Climate Change Adaptation and Disaster Risk Reduction ".



Wilhite, D. A. (2000). "Drought as a natural hazard: concepts and definitions."
Drought, a global assessment 1: 3-18.

WMO (1986). "Report on Drought and Countries Affected by Drought During
1974–1985." 118.