



**UNIVERSIDAD MICHOACANA DE  
SAN NICOLÁS DE HIDALGO**



**FACULTAD DE INGENIERÍA CIVIL**

**ANÁLISIS DE LAS SEQUÍAS EN EL BOSQUE LA PRIMAVERA,  
PERIODO HISTÓRICO Y FUTURO (CON CAMBIO  
CLIMÁTICO)**

**T E S I S**

PARA OBTENER EL TÍTULO DE:  
**INGENIERO CIVIL**

PRESENTA:  
**ANGEL FLORES PONCE**

ASESOR DE TESIS:  
**DRA. SONIA TATIANA SÁNCHEZ QUISPE**  
Doctora en Ingeniería de Caminos, Canales y Puertos

Morelia, Michoacán, México, Febrero 2020.



UNIVERSIDAD MICHOACANA DE SAN NICOLÁS DE HIDALGO

FACULTAD DE INGENIERÍA CIVIL

---



**ANÁLISIS DE LAS SEQUÍAS EN EL BOSQUE LA  
PRIMAVERA, PERIODO HISTÓRICO Y FUTURO (CON  
CAMBIO CLIMÁTICO)**

ANGEL FLORES PONCE

---

## **DEDICATORIAS**

A mi familia por el gran amor, apoyo, educación, fortaleza y respaldo que siempre me han brindado durante toda mi vida y en especial en mi etapa de universitario.

A esa gran fuente de energía y luz que es Dios

Por la fuerza que me ha otorgado para seguir adelante y poder lograr todas mis metas a pesar de las dificultades de la vida.

A mis padres Irma e Isaías, por ser mis motores de vida y mi más grande inspiración.

A mi hermana Amirais, por ser la mejor maestra y compañera de la vida que pude tener en mi vida.

A mi cuñado Alejandro, por demostrarme que la familia siempre está presente en cada momento para aportar lo mejor de cada uno.

## **AGRADECIMIENTOS**

A la Universidad Michoacana de San Nicolás de Hidalgo, y en especial a la Facultad de Ingeniería Civil, por la educación y todos los conocimientos que me han brindado en mi etapa universitaria.

A la Dra. Sonia Tatiana Sánchez Quispe por toda su enseñanza, su apoyo y confianza que me ha brindado para mi formación académica y profesional; por su apoyo, orientación y guía en el desarrollo de ésta tesis.

A mis amigos de la carrera, por su apoyo y amistad brindada durante esta etapa, por todos esos momentos mágicos que vivimos juntos y que siempre están en mi mente.

Al equipo que integra el departamento de hidráulica, por todo su apoyo brindado; en especial a mis compañeros académicos por su compañía durante este proceso, así como a mi servicio social por todo lo que me aportaron durante mi estancia.

A los sinodales: Dr. Constantino Domínguez Sánchez, Dr. Benjamín Lara Ledesma, Dr. Jorge Alejandro Ávila Olivera, Ing. Jerónimo Flores Francisco.

# ÍNDICE GENERAL

ÍNDICE GENERAL .....	I
ÍNDICE DE TABLAS .....	III
ÍNDICE DE FIGURAS .....	IV
RESUMEN .....	1
ABSTRACT .....	2
INTRODUCCIÓN .....	3
JUSTIFICACIÓN .....	6
HIPÓTESIS .....	7
OBJETIVOS .....	7
OBJETIVO GENERAL.....	7
OBJETIVOS PARTICULARES .....	7
<b>1. ESTADO DEL ARTE .....</b>	<b>8</b>
1.1 CAMBIO CLIMÁTICO .....	8
1.1.1 GASES DE EFECTO INVERNADERO Y EL CALENTAMIENTO GLOBAL.....	11
1.2 SEQUÍAS.....	12
1.2.1 TIPOS DE SEQUÍA.....	20
1.2.2 CLASIFICACIÓN DE SEQUÍAS.....	22
1.3 ZONA DE ESTUDIO .....	23
<b>2. MATERIALES Y MÉTODOS.....</b>	<b>27</b>
2.1 GESTIÓN DE DATOS.....	27
2.1.1 DATOS HISTÓRICOS.....	27
2.1.2 DATOS FUTUROS .....	30
2.2 ÍNDICES DE SEQUIA .....	32
2.2.1 ÍNDICE NORMALIZADO DE PRECIPITACIÓN (SPI).....	39
2.3 SECUENCIAS DE AÑOS SECOS Y AÑOS HÚMEDOS .....	41
2.4 DISTRIBUCIÓN ESPACIAL.....	42

<b>3.</b>	<b>RESULTADOS .....</b>	<b>43</b>
3.1	ANÁLISIS DE LA ZONA DE ESTUDIO .....	43
3.2	PRESELECCIÓN DE ESTACIONES.....	45
3.3	SELECCIÓN DE ESTACIONES Y LLENADO DE DATOS.....	55
3.4	SERIES DE CAMBIO CLIMÁTICO .....	59
3.5	APLICACIÓN DEL ÍNDICE ESTANDARIZADO DE PRECIPITACIÓN.....	70
3.6	AÑOS SECOS Y AÑOS HÚMEDOS .....	72
3.7	DISTRIBUCIÓN ESPACIAL DE LAS SEQUIAS .....	74
3.7.1	<i>SPI PERIODO HISTÓRICO.....</i>	<i>74</i>
3.7.2	<i>SPI PERIODO FUTURO CON CAMBIO CLIMÁTICO .....</i>	<i>79</i>
<b>4.</b>	<b>DISCUSIÓN DE RESULTADOS.....</b>	<b>102</b>
<b>5.</b>	<b>CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES .....</b>	<b>103</b>
5.1	CONCLUSIONES GENERALES .....	103
5.2	GESTIÓN DE DATOS.....	104
5.3	CAMBIO CLIMÁTICO .....	104
5.4	SEQUÍAS.....	105
5.5	RECOMENDACIONES .....	105
<b>6.</b>	<b>BIBLIOGRAFÍA .....</b>	<b>106</b>
<b>7.</b>	<b>ANEXOS.....</b>	<b>109</b>
7.1	ANEXO CAMBIO CLIMÁTICO MODELO DE FRANCIA.....	109

# ÍNDICE DE TABLAS

<i>Tabla 1-1 Definiciones generales de sequías en la literatura. Adaptado de Santos, 1981; Hoffman y Rantz, 1968; Schilling, 1977.</i>	15
<i>Tabla 2-1 Escenarios RCP. (Cavazos, 2013)</i>	32
<i>Tabla 2-2 Indicadores e índices Meteorológicos manual de la OMM</i>	36
<i>Tabla 2-3 Indicadores e índices de Humedad del suelo manual de la OMM</i>	37
<i>Tabla 2-4 Indicadores e índices de Hidrología manual de la OMM</i>	37
<i>Tabla 2-5 Indicadores e índices de Teledetección manual de la OMM</i>	38
<i>Tabla 2-6 Indicadores e índices Mixtos manual de la OMM</i>	38
<i>Tabla 3-1 Ubicación de las Estaciones en un radio de 80 km</i>	45
<i>Tabla 3-2 Preselección de estaciones meteorológicas</i>	46
<i>Tabla 3-3 Criterio de ubicación de estaciones</i>	50
<i>Tabla 3-4 Criterio de porcentaje de vacíos</i>	50
<i>Tabla 3-5 Criterio de periodo de años</i>	50
<i>Tabla 3-6 Criterio de selección de último año</i>	50
<i>Tabla 3-7 Criterio de la situación de la estación</i>	51
<i>Tabla 3-8 Codificación de criterios de preselección</i>	51
<i>Tabla 3-9 pre selección de las estaciones finales</i>	54
<i>Tabla 3-10 Pruebas de homogeneidad, tendencia e independencia</i>	55
<i>Tabla 3-11 Estaciones seleccionadas</i>	57
<i>Tabla 3-12 Datos de modelación de cambio climatico de Francia</i>	59
<i>Tabla 3-13 Datos de modelación de cambio climatico de Estados Unidos</i>	60
<i>Tabla 3-14 Datos de modelación de cambio climatico de Reino Unido</i>	60
<i>Tabla 3-15 Datos de modelación de cambio climatico de Alemania</i>	61
<i>Tabla 3-16 Cambio Climático en la zona de estudio</i>	63
<i>Tabla 3-17 Precipitación futura con RCP de 4.5 a Periodos 2015-2039, 2045-2069 y 2075-2099</i>	66
<i>Tabla 3-18 Precipitación futura con RCP de 4.5 a Periodos 2015-2039 y 2075-2099</i>	68
<i>Tabla 3-19 Rangos del SPI para sequía y humedad</i>	70
<i>Tabla 3-20 Sequias y Humedades de la estación 14002</i>	70
<i>Tabla 3-21 Años secos y Años húmedos</i>	73

# ÍNDICE DE FIGURAS

<i>Figura 1.1 Disponibilidad de precipitaciones promedio durante el periodo 1985-95, según Global Precipitation Center Project (<a href="http://daac.gsfc.nasa.gov/">http://daac.gsfc.nasa.gov/</a>)</i> .....	14
<i>Figura 1.2 Clasificación de diferentes fenómenos hidrometeorológicos de acuerdo a la disponibilidad de agua y la duración del evento.(Fernández,2005)</i> .....	14
<i>Figura 1.3 Zona de estudio “Bosque la primavera”</i> .....	24
<i>Figura 1.4 Zonificación del Bosque (<a href="http://www.bosquelaprimavera.com/mapa2.php">http://www.bosquelaprimavera.com/mapa2.php</a>)</i> .....	26
<i>Figura 2.1 Ejemplo de Curva de desviaciones acumuladas de precipitación (Martínez Alfaro, 2005)</i> .....	42
<i>Figura 3.1 Delimitación del Bosque La Primavera</i> .....	43
<i>Figura 3.2 Distribución espacial de las posibles estaciones meteorológicas</i> .....	46
<i>Figura 3.3 Programa Gestion de datos climatologicos</i> .....	58
<i>Figura 3.4 Mapa de precipitación para cambio climático</i> .....	62
<i>Figura 3.5 Mapa de temperatura para cambio climático</i> .....	62
<i>Figura 3.6 Comparación de la precipitación a un RCP 4.5 a diferentes periodos</i> .....	64
<i>Figura 3.7 Comparación de la precipitación a un RCP 8.5 a diferentes periodos</i> .....	64
<i>Figura 3.8 Comparación de la temperatura a un RCP 4.5 a diferentes periodos</i> .....	65
<i>Figura 3.9 Comparación de la temperatura a un RCP 8.5 a diferentes periodos</i> .....	65
<i>Figura 3.10 Sequias y Humedades de la estación 14002</i> .....	71
<i>Figura 3.11 Secuencia húmeda, secuencia media y secuencia seca de la estación 14002</i> .....	72
<i>Figura 3.12 Secuencia húmeda, secuencia media y secuencia seca de la estación 14056</i> .....	72
<i>Figura 3.13 Secuencia húmeda, secuencia media y secuencia seca de la estación 14089</i> .....	72
<i>Figura 3.14 Secuencia húmeda, secuencia media y secuencia seca de la estación 14066</i> .....	72
<i>Figura 3.15 Secuencia húmeda, secuencia media y secuencia seca de la estación 14136</i> .....	73
<i>Figura 3.16 Secuencia húmeda, secuencia media y secuencia seca de la estación 14132</i> .....	73
<i>Figura 3.17 Secuencia húmeda, secuencia media y secuencia seca de la estación FIC</i> .....	73
<i>Figura 3.18 Evolución espacial de la sequía en el bosque La Primavera año 1992</i> .....	74
<i>Figura 3.19 Evolución espacial de la humedad en el bosque La Primavera año 1989</i> .....	77
<i>Figura 3.20 Evolución espacial de sequias SPI 2015-2039 RCP 4.5</i> .....	79
<i>Figura 3.21 Evolución espacial de humedad SPI 2015-2039 RCP 4.5</i> .....	81
<i>Figura 3.22 Evolución espacial de sequias SPI 2045-2069 RCP 4.5</i> .....	83
<i>Figura 3.23 Evolución espacial de humedad SPI 2045-2069 RCP 4.5</i> .....	86
<i>Figura 3.24 Evolución espacial de sequias SPI 2075-2099 RCP 4.5</i> .....	88
<i>Figura 3.25 Evolución espacial de humedad SPI 2075-2099 RCP 4.5</i> .....	90

<i>Figura 3.26 Evolución espacial de sequías SPI 2015-2039 RCP 8.5 .....</i>	<i>93</i>
<i>Figura 3.27 Evolución espacial de humedad SPI 2015-2039 RCP 8.5 .....</i>	<i>95</i>
<i>Figura 3.28 Evolución espacial de sequías SPI 2075-2099 RCP 8.5 .....</i>	<i>97</i>
<i>Figura 3.29 Evolución espacial de humedad SPI 2075-2099 RCP 8.5 .....</i>	<i>100</i>
<i>Figura 7.1 Años que presentaron sequía en la evolución espacial de sequías SPI 2015-2039 RCP 4.5</i>	
<i>Modelo de Francia .....</i>	<i>109</i>
<i>Figura 7.2 Años que presentaron humedad en la evolución espacial de humedad SPI 2015-2039 RCP 4.5</i>	
<i>Modelo de Francia .....</i>	<i>110</i>

## **RESUMEN**

El cambio climático es una problemática ambiental que posee características únicas, las cuales tienen impactos mayores a largo plazo que involucran fenómenos ecológicos y climáticos, con lo cual se generan afectaciones de gran importancia en diferentes sectores en el país. Uno de los sectores que se ve afectado drásticamente, es el hídrico, ya que se presentan anomalías en las series futuras de precipitación y temperatura.

Uno de los fenómenos climáticos que más afecta a las actividades económicas del país es la sequía.

La sequía es un peligro natural insidioso resultante de unos niveles de precipitaciones por debajo de lo que se considera normal. Cuando este fenómeno se prolonga durante una estación o por un período de tiempo mayor, la precipitación es insuficiente para responder a las demandas de la sociedad y del medio ambiente.

Con el curso de los años los meteorólogos y climatólogos de todo el mundo han creado y utilizado muchos índices de sequía, como lo es el Índice normalizado de precipitación (SPI).

Con la aplicación del SPI se obtuvieron las sequias a periodos históricos así como futuros y se elaboraron los mapas de sequias de la zona de estudios para los diferentes periodos de estudio y así obtener las comparativas entre ellas.

Con el estudio de las precipitaciones futuras, además de conocer las posibles sequias que se pueden presentar, también se obtienen los efectos que provoca el cambio climático en los escurrimientos del sitio.

### **Palabras clave:**

Sequía, precipitación, ambiente, índice, hídrico.

## **ABSTRACT**

Climate change is an environmental problem that has unique characteristics, which have major long-term impacts that involve ecological and climatic phenomena, which generate major effects in different sectors in the country. One of the sectors that is drastically affected is the hydric, since there are anomalies in the future series of precipitation and temperature.

One of the climatic phenomena that most affects the economic activities of the country is drought.

Drought is an insidious natural hazard resulting from precipitation levels below what considered normal. When this phenomenon prolonged during a season or for a longer period, precipitation is insufficient to respond to the demands of society and the environment.

Over the years, meteorologists and climatologists around the world have created and used many drought indices, such as the Standard Precipitation Index “SPI”.

With the application of the SPI, obtained historical droughts as well as future periods and the drought maps of the study area were prepared for the different study periods and thus obtain comparisons between them.

With the study of future rainfall, in addition to knowing the possible droughts that may occur, the effects caused by climate change on the humidity of the site also obtained.

### **Keywords:**

Drought, precipitation, environment, index, hydric.

## INTRODUCCIÓN

El agua es un elemento indispensable para la existencia de vida en nuestro planeta, todos los seres vivos que habitamos la Tierra necesitamos de ella para sobrevivir. Desafortunadamente la disponibilidad del recurso agua en el planeta está disminuyendo, esto se debe al mal uso y tratamiento que damos a las aguas que utilizamos para satisfacer nuestras necesidades y a las variables climáticas que limitan la disponibilidad de agua. En los últimos años se ha hablado exponencialmente de variables climáticas, como el cambio climático, que están afectando considerablemente sectores importantes para la sociedad. (García Romero , 2015).

El concepto de cambio climático, surge por primera vez en el siglo XIX, como resultado de estudios geológicos que encontraron, que desde épocas prehistóricas, la Tierra había presentado variaciones en el clima. Durante mucho tiempo se discutió acerca de los impactos que la actividad humana pudiera tener en dichos cambios, pero fue en los años 60's que la evidencia científica comenzó a apoyar la noción de que las actividades de origen antropogénico pudieran en realidad estar afectando el clima global. (Martínez & Fernández, 2004).

En México, 90 millones de habitantes se abastecen de agua proveniente de los mantos acuíferos (INEGI, 2017), ante ello, existe la necesidad de conocer la disponibilidad hídrica tanto superficial como subterránea en distintas zonas de estudios a lo largo de todo el país, dicha disponibilidad puede ser utilizada para la generación de energía eléctrica por medio de plantas geotérmicas.

El cambio climático es un problema ambiental con características únicas, ya que es de competencia global, se plantea que sus impactos mayores serán a largo plazo e involucra interacciones complejas entre procesos naturales (fenómenos ecológicos y climáticos), procesos sociales, económicos y políticos de índole mundial.

Como caso particular, se evalúa cuantitativamente el cambio en las series de precipitación y temperatura debido al impacto del cambio climático en la zona del bosque La Primavera, Jalisco; donde es imperativo la realización de estudios hidrológicos para conocer el estado hídrico actual debido a la importancia que posee por ser un Área de Protección de Flora y Fauna.

El Bosque la Primavera cuenta con una extensión de 40 mil hectáreas, de las cuales 30 mil 500 forman parte del Área de Protección de Flora y Fauna La Primavera (APFFLP), decretada por el Gobierno Federal el 6 de marzo de 1980. El 27 de octubre de 2006, la Mesa del Consejo Internacional de Coordinación del Programa MAB de la Organización de las Naciones Unidas para la Educación, la Ciencia y la Cultura (UNESCO) incorporo el APFFLP en la Red Mundial de Reservas de la Biosfera del MAB-UNESCO, esta Área Protegida es de las más importantes del occidente del país y constituye el “pulmón” de la Zona Metropolitana de Guadalajara (CONANP, 2000).

El efecto del cambio climático ha sido un factor importante en el incremento de la temperatura, lo cual se ve directamente involucrado en la presencia de sequías.

En términos generales una sequía corresponde a una situación de déficit de agua suficiente para afectar adversamente a la vegetación, los animales o el hombre y su actividad en una región determinada. Tiene la particularidad de ser un fenómeno de desarrollo lento en el tiempo y de amplia cobertura espacial, lo que hace difícil precisar con exactitud tanto su duración como su extensión física. Estos límites pueden establecerse con propiedad una vez que la sequía ha transcurrido totalmente y se la observa desde una perspectiva histórica, pero no mientras ocurre el fenómeno, lo que dificulta la adopción de medidas concretas durante su desarrollo. (Fernández, 2005).

Las sequías no se parecen a la mayoría de los desastres naturales que son repentinos, breves y violentos como los terremotos, las crecidas, los huracanes, etc. Se trata más bien de un desastre que se desarrolla lentamente, acumulando sus efectos nocivos durante un periodo

prolongado. El clima y la meteorología no son la única causa de las sequías, también dependen del comportamiento del sistema y de la sociedad afectada.

Las sequías son el resultado de un proceso complejo en el que intervienen tanto la oferta como la demanda. Esta última depende en gran medida del grado de utilización de los recursos hídricos en una zona y la eficiencia con que ellos se empleen. (Fernández, 2005).

El cambio climático no se considera más como un problema que compete sólo a los países desarrollados. Por tanto, es tarea de países como México involucrarse en el estudio de éste y tratar de instrumentar a corto plazo aquellas acciones de política que permitan la mitigación del mismo; a mediano y largo plazo le corresponde crear estrategias y planes que le permitan adaptarse y mitigar el cambio climático en nuestro país. Para poder lograrlo es evidente que México necesita trabajar y desarrollarse en esta línea de investigación.

## JUSTIFICACIÓN

El cambio climático es un tema de importancia internacional, ya que cada vez con más frecuencia se registran eventos meteorológicos extremos, los cuales han dejado severos daños, tanto económicos, como ecológicos y humanos.

Esta problemática sin duda podría llegar a afectar diferentes sectores económicos, políticos y sociales de cualquier sitio; la magnitud de dicha afectación dependerá de la vulnerabilidad de cada zona, lo que significa que las condiciones climáticas serán diferentes para cada sitio y las variables climáticas reflejarán estas afectaciones en distintas escalas.

El recurso hídrico es uno de los sectores que más preocupación muestran ante el fenómeno del cambio climático en todo el mundo. Actualmente los recursos hídricos existentes no son suficientes para abastecer la demanda de la sociedad, con fenómenos poco predecibles como lo es el cambio en el clima, la situación se vuelve más preocupante.

No se tienen estudios hidrológicos actualizados para el Área de Protección de Flora y Fauna La Primavera; por lo que resulta imperativo realizar un conjunto de estudios multidisciplinarios para conocer la situación actual de la zona en cuestión, de tal forma que se pueda obtener la disponibilidad del recurso tanto superficial como subterráneo, para así, poder ver la afectación que estos sufrirán con este cambio climático existente.

El análisis de las sequias en el bosque de la primavera es de suma importancia debido a que este es una zona de protección de flora y fauna, que se ve afectada por estas variaciones climáticas de precipitación y de temperatura, poniendo en mayor vulnerabilidad al bosque de la primavera y con ello a toda su flora y fauna en protección.

## **HIPÓTESIS**

El cambio climático afecta las series futuras de precipitación y temperatura en el Área de Protección de Flora y Fauna La Primavera, haciendo que esto genere mayor cantidad de sequías a futuro que las vividas en un pasado.

## **OBJETIVOS**

### **OBJETIVO GENERAL**

Evaluar el impacto de las sequías en el Área de Protección de Flora y Fauna La Primavera, a corto y largo plazo (afectado por el cambio climático), mediante el uso de modelos hidrológicos.

### **OBJETIVOS PARTICULARES**

- Obtener los datos meteorológicos y de cambio climático de la zona de estudio, para su correcto análisis y corrección de los datos para su uso.
- Obtención de las secuencias de años secos y de años húmedos
- Selección del mejor indicador de sequía para trabajar con él y hacer las respectivas comparaciones.
- Modelar en un software los niveles de sequía y de humedad por el método de SPI, para realizar comparativa éntrelos diferentes RCP trabajados.
- Obtener las posibles sequías futuras, para realizar la comparativa con las históricas y ver la afectación por el cambio climático.

## 1. ESTADO DEL ARTE

El agua es un elemento indispensable para la existencia de vida en nuestro planeta, todos los seres vivos que habitamos la Tierra necesitamos de ella para sobrevivir. Desafortunadamente la disponibilidad del recurso agua en el planeta está disminuyendo, esto se debe al mal uso y tratamiento que damos a las aguas que utilizamos para satisfacer nuestras necesidades y a las variables climáticas que limitan la disponibilidad de agua. En los últimos años se ha hablado exponencialmente de variables climáticas, como el cambio climático, que están afectando considerablemente sectores importantes para la sociedad. (García Romero , 2015).

### 1.1 CAMBIO CLIMÁTICO

Podemos definir al clima como un conjunto de condiciones atmosféricas que caracterizan una región, el cual está representado por el promedio del estado del tiempo incluyendo las variables superficiales de temperatura, precipitación o viento. Analíticamente, el clima es considerado como una descripción estadística del tiempo en términos de valores medios y de variabilidad de las cantidades de interés durante periodos de varias décadas. El clima es el promedio de muchos estados del tiempo en un lapso de meses, años o décadas. La constancia del tiempo puede determinar el tipo de clima en cierta área. (García Romero , 2015).

El tiempo y el clima están muy relacionados. El tiempo es determinista y el clima es probabilista. La inestabilidad de la naturaleza y actividad de los factores que componen y

determinan el tiempo lo hacen difícil de predecir más allá de unos cuantos días; pero los cambios en el clima se pueden predecir a partir de diferentes estudios sobre los registros históricos de los estados del tiempo.

Al conjunto de cambios que son naturales y que forman parte del funcionamiento del sistema climático se le conoce como variabilidad climática, entonces ¿hasta dónde un evento es cambio climático y hasta cuando se considera como variabilidad climática?

El cambio climático como problema ambiental global se compone de una serie de transformaciones en el clima que no son naturales y que alteran a todos los componentes del sistema climático. Es importante diferenciar el término de cambio climático respecto de la variabilidad climática.

El cambio climático es uno de los mayores desafíos de nuestro tiempo y supone una presión adicional para nuestras sociedades y el medio ambiente. Desde pautas meteorológicas cambiantes, que amenazan la producción de alimentos, hasta el aumento del nivel del mar, que incrementa el riesgo de inundaciones catastróficas, los efectos del cambio climático son de alcance mundial y de una escala sin precedentes. Si no se toman medidas drásticas desde hoy, será más difícil y costoso adaptarse a estos efectos en el futuro. (NU, 2018)

Es toda variación global perteneciente al clima del planeta. Se presenta por distintas causas; entre ellas naturales, por acción del ser humano y por factores energéticos. Por lo general se producen a ciertas escalas de tiempo difíciles de medir; pero se enlazan a distintos parámetros de todo el medio ambiente. Estos parámetros son:

- Temperatura
- Precipitaciones
- Nubosidad

El cambio climático es la variación estadísticamente significativa del clima con respecto al periodo histórico a una escala global o regional. Estos cambios se dan en los parámetros meteorológicos como la precipitación, temperatura, presión atmosférica, nubosidad, a diferentes escalas de tiempo. Teóricamente estas variaciones son producidas por causas naturales y antropogénicas. (Martínez & Fernández, 2004).

Es un cambio en el clima que es atribuido directa o indirectamente a las actividades humanas que altera la composición global de la atmósfera y a la variabilidad climática que ha sido comparada con otros periodos de tiempo.

El cambio climático ha tenido lugar desde miles de millones de años, como producto de muchas causas generadas por la actividad humana; pero también por aquellas intervenciones donde la energía tanto interna, como externa en la principal alterada.

El clima en el planeta no se caracteriza por ser estático; pero si bien es cierto las variaciones que se han presentado desde su existencia han ido marcado períodos especiales que se definen entre una época y otra; unas destacando más que otras. (WWF, 2018)

El cambio climático es el mal de nuestro tiempo y sus consecuencias pueden ser devastadoras si no reducimos drásticamente la dependencia de los combustibles fósiles y las emisiones de gases de efecto invernadero. De hecho, los impactos del cambio climático ya son perceptibles y quedan puestos en evidencia por datos como:

- El aumento de la temperatura global
- La subida del nivel del mar
- El progresivo deshielo de las masas glaciares, como el Ártico

Pero hoy también estamos viendo los impactos económicos y sociales, que serán cada vez más graves, como:

- Daños en las cosechas y en la producción alimentaria

- Las sequías
- Los riesgos en la salud
- Los fenómenos meteorológicos extremos, como tormentas y huracanes

### 1.1.1 GASES DE EFECTO INVERNADERO Y EL CALENTAMIENTO GLOBAL

El cambio climático es atribuido principalmente al alto índice de emisiones de Gases de Efecto Invernadero a la atmósfera, éstos son principalmente derivados del empleo de combustibles fósiles utilizados en las actividades humanas (carbón, petróleo, gasolinas y los combustibles derivados del petróleo), así como la tala inmoderada, incendios forestales y la contaminación del agua y el suelo. Sin embargo, no podemos atribuir el cambio climático únicamente a procesos empleados y actividades desarrolladas por el ser humano, también existen procesos de origen natural que pueden contribuir a la contaminación atmosférica y por ende a contribuir con el cambio climático.

Los Gases de Efecto Invernadero son aquellos que se establecen en la estratosfera, además de que absorben y emiten radiación en longitudes de onda en el espectro infrarrojo, entre las que está la radiación térmica. Clasificados en dos grandes grupos; los de origen natural, como es el vapor de agua (H<sub>2</sub>O) principal gas de efecto invernadero, el bióxido de carbono (CO<sub>2</sub>), óxido nitroso (N<sub>2</sub>O), metano (CH<sub>4</sub>) y ozono (O<sub>3</sub>), así como los de origen antropogénico; entre los que está nuevamente; el bióxido de carbono (CO<sub>2</sub>), óxido nitroso (N<sub>2</sub>O) y el metano (CH<sub>4</sub>), además de los producidos exclusivamente por el hombre, como son los halocarbonos y otras sustancias que contienen cloro y bromuro, los hidrofluorocarbonos (HFC), entre otros. (Montreal, 2019).

El cambio de temperatura actual está sucediendo en un espacio de tiempo muy corto, esto se vincula al aumento en la concentración de los Gases de Efecto Invernadero (GEI) como

el dióxido de carbono (CO<sub>2</sub>), metano (CH<sub>4</sub>), vapor de agua (H<sub>2</sub>O), ozono (O<sub>3</sub>) y óxido nitroso(N<sub>2</sub>O).

El 68% de las emisiones globales vienen de sólo diez países entre ellos México, contribuyendo con el 1.68%. Las principales fuentes de emisiones de los GEI en México son el transporte, la generación de electricidad y la industria.

Se han relacionado científicamente varios hechos:

- La concentración de GEI en la atmósfera terrestre está directamente relacionada con la temperatura media mundial de la Tierra;
- Esta concentración ha ido aumentando progresivamente desde la Revolución Industrial y, con ella, la temperatura mundial;
- El GEI más abundante, el dióxido de carbono (CO<sub>2</sub>), es resultado de la quema de combustibles fósiles.

Es uno de los mayores desafíos de nuestro tiempo. Las alteraciones en los patrones de los eventos climatológicos y las temperaturas extremas son cada vez más comunes y aumentarán si hay una mayor concentración de gases de efecto invernadero.

El cambio climático pone en riesgo la salud, la seguridad alimentaria y energética, así como el acceso al agua de millones de mexicanos. (WWF, 2018).

## 1.2 SEQUÍAS

En términos generales una sequía corresponde a una situación de déficit de agua suficiente para afectar adversamente a la vegetación, los animales o el hombre y su actividad en una

región determinada. Tiene la particularidad de ser un fenómeno de desarrollo lento en el tiempo y de amplia cobertura espacial, lo que hace difícil precisar con exactitud tanto su duración como su extensión física. Estos límites pueden establecerse con propiedad una vez que la sequía ha transcurrido totalmente y se la observa desde una perspectiva histórica, pero no mientras ocurre el fenómeno, lo que dificulta la adopción de medidas concretas durante su desarrollo. Según este enfoque lo importante de las sequías son sus consecuencias y no tanto sus causas o sus propiedades intrínsecas. Para ser realista y operativa una definición apropiada de sequía debe considerar la realidad de cada lugar.

Las sequías no se parecen a la mayoría de los desastres naturales que son repentinos, breves y violentos como los terremotos, las crecidas, los huracanes, etc. Se trata más bien de un desastre que se desarrolla lentamente, acumulando sus efectos nocivos durante un periodo prolongado. El clima y la meteorología no son la única causa de las sequías, también dependen del comportamiento del sistema y de la sociedad afectada.

Es necesario diferenciar entre aridez y sequía, ya que la primera es una condición climática de escasez de humedad permanente, que afecta a ciertos lugares de la Tierra reflejo de condiciones promedio, mientras la sequía es un fenómeno transitorio que puede afectar a cualquier lugar como consecuencia de la variabilidad temporal de la disponibilidad de humedad. Como otros fenómenos de la naturaleza las causas precisas que le dan origen no se conocen aún con suficiente precisión como para establecer relaciones efectivas que permitan estimar con anticipación su inicio o final. (Fernández, 2005).

En general la demanda de agua está fijada por la actividad humana mientras la oferta está condicionada por el clima. Como tanto los factores climáticos como la actividad humana son cambiantes, la oferta y la demanda de agua varían a lo largo del tiempo y también de un lugar a otro, de manera que las sequías que en base a ellas se definen tienen propiedades que se comportan como variables aleatorias, cuyas estadísticas entregan información valiosa para predecir el comportamiento futuro.

La Figura 1.1 muestra la disponibilidad promedio de precipitaciones sobre la tierra en un periodo de 10 años. Las zonas más áridas se ubican sobre los grandes desiertos mundiales (Sahara, Atacama, Namibia, etc). Sin embargo los límites de estas zonas no son precisos y están sujetos a desplazamientos, de manera que se extienden o disminuyen dependiendo de las condiciones meteorológicas. Las zonas que se ubican alrededor de estas regiones de extrema aridez se ven enfrentadas a sequías frecuentes y severas.

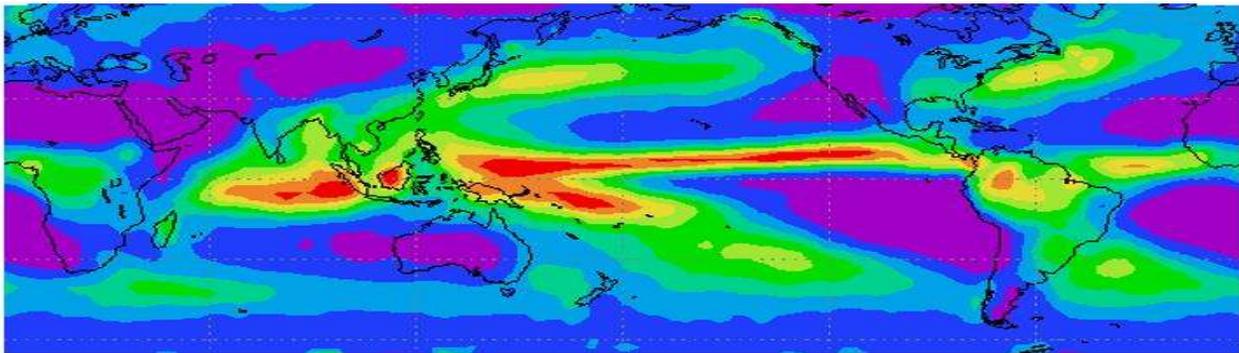


Figura 1.1 Disponibilidad de precipitaciones promedio durante el periodo 1985-95, según Global Precipitation Center Project (<http://daac.gsfc.nasa.gov/>)

La Figura 1.2 muestra la ubicación relativa de varios fenómenos típicos de acuerdo según un sistema que considera la disponibilidad de agua y la duración del evento en términos generales, clasificando en ella las tormentas, crecidas, inundaciones, el estío, o los pantanos, humedales, los estiajes en comparación con las sequías.

Disponibilidad de agua	Excesiva	Tormentas Crecidas Inundaciones	Zonas húmedas Pantanos	
	Medía	Estío Estiajes	SEQUIAS	
	Escasa	Suelo seco		
		Corta	Media	Larga
		Duración del evento		

Figura 1.2 Clasificación de diferentes fenómenos hidrometeorológicos de acuerdo a la disponibilidad de agua y la duración del evento.(Fernández,2005)

En un sentido general, una sequía es considerada como un estado de anormalmente escasa disponibilidad de agua en una región que se prolonga durante un periodo de tiempo significativo.

La Tabla 1-1 contiene una lista de varias de las definiciones de sequía disponibles en la literatura técnica. A pesar de que es evidente la existencia de gran cantidad de definiciones, la mayoría de ellas pueden clasificarse en unas pocas categorías: a) Aquellas en las cuales la sequía se define cuando una cantidad absoluta de humedad (lluvia, caudales o humedad del suelo) es inferior a una cantidad determinada (por ejemplo cuando no llueve en 20 días consecutivos), b) Las que consideran la desviación de las condiciones normales o del promedio por una cierta cantidad (por ejemplo cuando la lluvia en un periodo es menos que el 60% del promedio), y c) Las definiciones según las cuales ocurre una sequía cuando la cantidad de agua disponible es insuficiente para satisfacer las necesidades. Esta última categoría de definiciones es bastante subjetiva, e indica que la ocurrencia de sequía puede cambiar en el tiempo en un mismo lugar, dependiendo del grado de utilización de los recursos.

A pesar de que puede parecer más razonable definir las sequías de una manera puramente estadística en base a la desviación de las condiciones normales, es difícil separar la idea de sequía de sus consecuencias. (Fernández, 2005).

*Tabla 1-1 Definiciones generales de sequías en la literatura. Adaptado de Santos, 1981; Hoffman y Rantz, 1968; Schilling, 1977.*

<b>Autor</b>	<b>Año</b>	<b>Definición de sequía o del concepto asociado</b>
<b>Russell</b>	<b>1896</b>	<b>Un periodo de meses o años durante los que cae poca precipitación.</b>
<b>Brounov</b>	<b>Principios siglo XX</b>	<b>Periodo de 10 días con menos de 5mm de precipitación total</b>
<b>Henry</b>	<b>1906</b>	<b>Periodo de 21 días o más durante los cuales la lluvia es menos que el 30% del promedio del lugar para esa época. Sequía extrema, periodo de 21 días en que la precipitación no alcanza al 10% del promedio</b>

Cole	1933	Periodo de 15 días sin lluvia
Bates	1935	Ocurre una sequía cuando la precipitación anual es menor o igual al 75% de lo normal, o cuando la precipitación de un mes es menor que el 60% de lo normal
British Rainfall Organization	1936	Sequía absoluta: al menos 15 días consecutivos en los cuales ninguno recibe más de 0,25mm  Sequía Parcial: al menos 29 días durante los cuales la precipitación media no excede de 0,25mm por día  Periodo seco: 15 días consecutivos en que ninguno recibe más de 1mm
Hoyt	1938	Periodo en el cual cualquier precipitación es menor que el 85% de lo normal
Hoyt	1938	Una condición que se produce siempre que la precipitación no sea suficiente para satisfacer las necesidades humanas establecidas.
Baldwin-Wiseman	1941	Tres meses o más con un déficit del 50% o más de la precipitación normal
Blumenstock	1942	Periodo de al menos 48 horas con una precipitación total inferior a 2,5mm
Condra	1944	20 ( o 30) días consecutivos, o más, sin 6,4mm de precipitación en 24 horas durante los meses de Marzo a Septiembre inclusive (EE.UU.)
Condra	1944	Periodo de fuertes vientos, bajas precipitaciones, altas temperaturas y normalmente poca humedad relativa.
Tennessee Valley Authority	1944	Periodo de 21 días en que la precipitación caída es menor o igual que un tercio de lo normal
Barger y Thorn	1949	Cuando la lluvia es menos que el mínimo requerido durante periodos de 2 a 16 semanas para satisfacer el crecimiento de un cultivo específico
Ramdas	1950	Una semana con precipitaciones iguales o menores de la mitad de lo normal
Great Britain Meteorological Office	1951	Periodo de más de alguna cantidad particular de días con precipitación menor que una cantidad pequeña específica
Van Bavel	1953	Las sequía ocurren en esos días en que la humedad disponible en el suelo es menor que las necesidades para crecer satisfactoriamente del cultivo dominante
Gausson	1954	Un mes con un total de precipitación en mm menor que dos veces la temperatura media en °C

White	1955	Periodo de tiempo en que predominan una o todas de las siguientes condiciones: a) las empastadas comienzan a escasear, b) el ganado pierde sus condiciones razonables, c) los animales silvestres se ajustan a las condiciones de escasez
Van Bavel y Verlinden	1956	Días en que la humedad disponible del suelo desciende a una pequeña proporción de la capacidad disponible en el lugar
McGuire y Palmer	1957	Periodos en que la precipitación mensual o anual es menor que un porcentaje particular de la precipitación normal
Alpatev y Ivanova	1958	Años en que la producción agrícola desciende en 25% de la producción media de largo plazo.
Kulik	1958	Semi-sequía: diez días con menos de 20mm de agua en los primeros 20cm de suelo  Sequía: diez días con menos de 10mm de agua en los primeros 20cm de suelo.
Ramdas		Cuando la lluvia caída en una estación es deficiente por más de dos veces la precipitación normal
Oxford English Dictionary	1961	1.- La condición de ser seco: sequedad, aridez, falta de humedad (arcaico) 2.- Sequedad del tiempo o del clima; falta de lluvia (sentido actual) 3.- Terrenos secos, desierto (obsoleto ) 4.- Sed (arcaico y dialectos)
Thomas	1962	Fenómeno atmosférico que ocurre cuando la precipitación es menor que el promedio de largo plazo y cuando esta deficiencia es suficientemente grande y larga para afectar a la humanidad.
Hudson y Hazen	1964	Reconoce la definición estándar del USWB pero hace notar que en Bali una sequía ocurre cuando hay 6 días sin lluvia, mientras en Libia cuando no llueve en dos años y en Egipto cualquier año en que el río Nilo no provoca inundación, independientemente de la precipitación.  El concepto de sequía se refiere a periodos de inusual poca disponibilidad de agua independiente de la demanda de agua en un lugar específico.
Palmer	1966	Periodo de tiempo, generalmente del orden de meses o años de duración, durante los cuales la disponibilidad de humedad en un lugar dado consistentemente está por debajo de lo esperado climáticamente o de la disponibilidad de humedad apropiada para ese clima.
Rickard	1966	Periodo de tiempo durante el cual el agua en el suelo en la zona de las raíces está por debajo que el que corresponde al punto de marchitez permanente. La condición permanece hasta que la precipitación cae en exceso de la evapotranspiración.

Whipple	1966	<p>Periodo de uno o más años, que siguen un año húmedo, durante los cuales ya sea a) todos los años son secos, o b) cualquier año consecutivo no seco tiene un exceso de sobre el promedio anual de largo plazo el cual no excede o de un tercio del promedio anual o de un medio de la deficiencia acumulada bajo el promedio anual de los años que le preceden en la sequía.</p> <p>Año de sequía: un año para el cual la escorrentia total es menor que la descarga promedio de largo plazo.</p> <p>Año no de sequía: Año en que la descarga anual no es menor que la descarga promedio de largo plazo.</p>
Saarinen	1966	<p>Es más fácil definir una sequía de manera precisa después de su ocurrencia que durante el periodo en el cual es más y más severa.</p> <p>Una sequía permanente es aquella en que la precipitación no es suficiente para satisfacer las necesidades de la evapotranspiración potencial.</p> <p>Una sequía estacional es cuando en una estación del año se recibe una cantidad inadecuada de precipitación, mientras el resto de las estaciones pueden recibir cantidades adecuadas.</p> <p>Una sequía invisible es aquella que presenta en la periferia temporal cantidades de precipitación que no son suficientes como para satisfacer las demandas de los cultivos y produce una disminución de los rendimientos de cosecha.</p>
Yevjevich	1967	Déficit en la oferta de agua durante el tiempo, sobre un área o en ambos.
Downer et al.	1967	Déficit de agua bajo un valor de referencia dado, en que intervienen tanto la duración como la magnitud de los déficits
Real A. Española de la Lengua	1970	Tiempo seco prolongado
Millán	1973	Déficit o escasez del agua disponible, provocado por las características aleatorias del fenómeno natural que controla la distribución de agua sobre la superficie de la tierra y el tiempo
World Book Enciclopedia	1975	Las sequías ocurren cuando el promedio de lluvias sobre una zona fértil está por debajo de la cantidad considerada normal para un periodo prolongado
Guerrero-Salazar y Yevjevich	1975	Deficiencia en el abastecimiento de agua para satisfacer las demandas de diferentes actividades humanas durante un tiempo significativo
Linsley et al	1975	Periodo durante el cual los escurrimientos son inadecuados para abastecer usos establecidos bajo un sistema de gestión de recursos dado
Gibbs	1975	Falta de agua suficiente para satisfacer las necesidades, o los requerimientos dependientes de la distribución de plantas, o población

		de animales o humana, su estilo de vida y el uso que hacen de la tierra.
Beran		Deficiencia de humedad de tal magnitud como para afectar adversamente las actividades humanas habituales de la región.
Seth et al.	1979	Evento en el cual la cantidad de agua disponible es menor que el mínimo requerido para la normal operación de una actividad particular en una región.
Da Cunha	1983	Las sequías ocurren cuando se presenta un déficit significativo de agua, que se prolonga en el tiempo y esparce en el espacio. Por significativo se quiere indicar que sus impactos económicos, sociales o ambientales son importantes para los humanos.
Beran y Rodier	1985	Sequía es un concepto relativo, pero su principal característica es una disminución de la disponibilidad de agua en un periodo particular y en un área particular en vez de un descenso general de las disponibilidades de agua.
Wilhite	1993	Las sequías son una consecuencia de la reducción natural de la cantidad de precipitación recibida durante un periodo de tiempo largo, normalmente una estación o más.
USCE	1994	Las sequías son periodos de tiempo durante los cuales los sistemas hídricos naturales o intervenidos no proveen de suficiente agua para satisfacer los usos humanos y ambientales establecidos debido a la escasez natural de precipitaciones o escurrimientos
National Drought Mitigation Center	1998	En general, sequía es cuando la escasez de precipitación provoca una escasez de agua, independientemente de si esta es utilizada en los cultivos, abastecimiento urbano, recreación, vida silvestre u otros propósitos.

En la historia de México los efectos de la sequía se han palpado intensamente durante los últimos años, y a pesar de las devastadoras consecuencias el conocimiento sobre ellas aun es relativamente limitado. (Escalante & Reyes, 2002).

El ingeniero Iván (González Arreguín, 2018) aplica modelos matemáticos para la evaluación del riesgo de sequía operativa, en el sistema de recursos hídricos de la cuenca del río Tepalcatepec, aplicando una metodología a base de modelos como EvalHid que pueden utilizarse para caracterizar las sequías utilizando indicadores de probabilidad de

precipitaciones en periodos de tiempo, por otro lado el ingeniero Juan Antonio (Torres Martínez, 2014) aplica distintos índices de sequía, entre ellos el Índice de Precipitación Estandarizado, mediante estos índices se pueden caracterizar las sequias e identificar cómo se comportará la sequía espacialmente mediante la generación de mapas informativos, temporalmente a lo largo del tiempo.

### 1.2.1 TIPOS DE SEQUÍA

Una de las tipologías más aceptadas en cuanto a sequías es la de (Wilhite & Glantz, 1985), quienes definieron cuatro tipos de sequía, los cuáles se presentan en forma consecutiva, es decir si una de ellas se mantiene da origen a la siguiente dando origen al otro generando diversos efectos en la región.

#### 1.2.1.1 SEQUÍA METEOROLÓGICA

Consiste en una disminución de la precipitación por debajo de lo normal, definiendo como normal a la precipitación específica para una región, en un tiempo determinado. La magnitud de la desviación y del tiempo, no son fijos, ya que dependen de la región y las condiciones climáticas que se presenten para evaluarla. La sequía meteorológica se presenta en cualquier región del mundo ya que su presencia no tiene relación directa con la gestión de recursos hídricos o actividades socioeconómicas, dependiendo únicamente de la variabilidad natural del clima (NDMC, 2006)

### 1.2.1.2 SEQUÍA HIDROLÓGICA

La sequía hidrológica es asociada comúnmente con los efectos de la sequía meteorológica, es decir al tener periodos deficientes de precipitación se ve reflejado directamente sobre los escurrimientos de agua superficial e igualmente sobre la disponibilidad del agua subterránea. Los efectos de este tipo de sequía impactan directamente la recarga de acuíferos, lagos, presas, generando consecuencias a largo plazo en la gestión de los recursos afectando a los usuarios y creando conflictos (NDMC, 2006)

### 1.2.1.3 SEQUÍA AGRÍCOLA

Este tipo de sequía está muy relacionada con la sequía meteorológica e hidrológica, considerando el impacto sobre los cultivos. La sequía agrícola considera la evaluación de la evapotranspiración real, potencial, el déficit de agua en el suelo que a su vez depende de características físicas del mismo, los niveles de reserva de agua, además de los requerimientos de humedad del cultivo necesarios para un eficiente desarrollo y evitar un bajo rendimiento de los mismos. La sequía agrícola se presenta en gran medida al realizar una mala gestión de los recursos hídricos en combinación con la sequía meteorológica e hidrológica (NDMC, 2006)

### 1.2.1.4 SEQUÍA SOCIOECONÓMICA

La sequía socioeconómica se basa en el suministro de agua y demanda de grupos humanos, pero también en bienes económicos como producción agrícola, generación de energía hidroeléctrica y demás servicios que dependen del agua. Se relaciona con los efectos de

corto y largo plazo de los otros tipos de sequía. Un caso común ocurre cuando la demanda de la población excede a la disponible de la precipitación. (NDMC, 2006).

## 1.2.2 CLASIFICACIÓN DE SEQUÍAS

Una vez determinado el tipo de sequía, ella a su vez la podemos clasificar de diversas formas. De acuerdo con la Secretaría de Gobernación (SEGOB, 2000) las sequías se pueden clasificar por el clima o por su magnitud.

### 1.2.2.1 SEQUÍAS POR CLIMA

- a. Permanentes: se producen en zonas de climas cálidos.
- b. Estacionales: se observan en sitios con temporadas lluviosas y secas bien definidas.
- c. Contingentes: se presentan en cualquier época del año debido a periodos prolongados de calor, a falta de lluvias o a la coincidencia de ambos.
- d. Invisibles: ocurren cuando las lluvias del verano no cubren las pérdidas de humedad por evaporación.

### 1.2.2.2 SEQUÍAS POR MAGNITUD

- a. Leves: son aquellas que tienen como causa la escasez parcial de lluvias y no repercuten de manera importante en la producción ni en la economía.

b. Moderadas: Son las originadas por una disminución significativa de la precipitación que afecta a la producción agrícola.

c. Severas: son las que se producen por la disminución general o total de lluvias, con daños cuantiosos a la producción.

d. Extremadamente severas: son producto del proceso permanente de escasez de agua que provoca crisis en la agricultura y en la ganadería, por consecuencia en la economía y la sociedad.

### 1.3 ZONA DE ESTUDIO

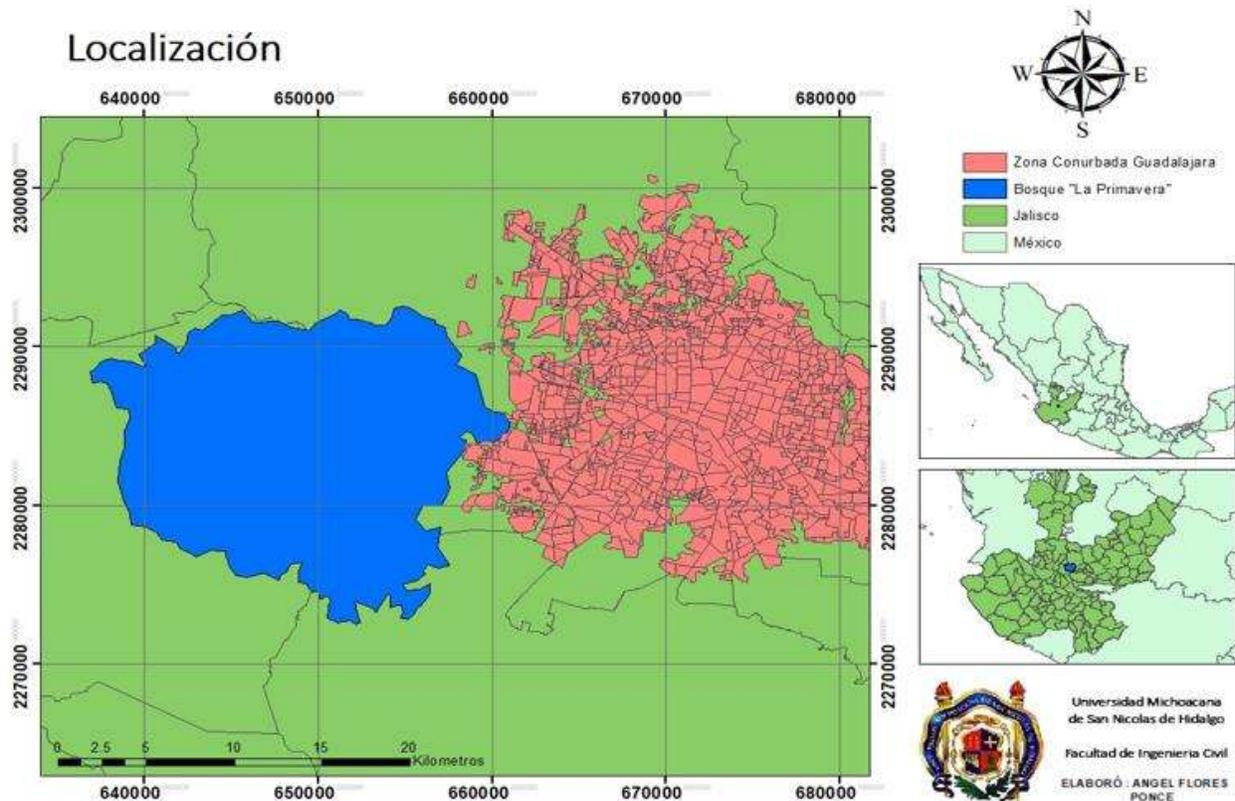
El reconocimiento de la zona que se va a estudiar permite tener en mente las características propias de ésta para poder tomar las decisiones adecuadas cuando se requiera; además puede orientar al modelador en el análisis de los resultados que se obtengan, permitiendo comparar éstos contra los que se pudieran tener en zonas estudiadas anteriormente.

El bosque La Primavera, es una amplia zona forestal localizada en el estado mexicano de Jalisco. Su ubicación se encuentra al oeste de la ciudad de Guadalajara, compartiendo terreno entre los municipios de Zapopan, Tala y Tlajomulco de Zúñiga convirtiéndose en el "pulmón" de la zona metropolitana de Guadalajara y sus alrededores. Desde el año 1934 ha contado con diversas declaratorias como zona forestal protegida tanto federales como estatales, como la otorgada en 1980 por el presidente José López Portillo como zona de protección forestal y refugio de la fauna silvestre.

Ubicación: 20°37'59.25"N 103°33'35.37"O

La primavera, como se conoce comúnmente al Área Protegida, tiene sus orígenes hace aproximadamente 140,000 años. Producto de una serie de erupciones volcánicas de la que

emergieron productos piroclásticos cubriendo un área aproximada de 700 km<sup>2</sup>. Esta actividad volcánica terminó después de formarse el cerro conocido como El Colli hace unos 27,000 años, siendo este el domo más reciente. (BLP, 2019).



*Figura 1.3 Zona de estudio "Bosque la primavera"*

El Bosque La Primavera con sus 140 mil años de existencia, es la más grande reserva ecológica que queda hacia el poniente del Área Metropolitana de Guadalajara, ha sobrevivido miles de años a múltiples circunstancias adversas, sin embargo, se ha visto disminuida ante la acción de los humanos que no queremos aprender la lección sobre la gran importancia que tiene cuidarlo para conservarlo.

El 6 de marzo de 1980 se publica en el DOF el Decreto en el que por causas de interés público se establece como Zona de Protección Forestal y Refugio de la Fauna Silvestre la región conocida como "La Primavera", con una superficie de 30,500 hectáreas, conservando la tenencia de la tierra quedando en manos de propietarios particulares, propiedad social en 11 ejidos y sólo una pequeña parte es propiedad del Gobierno del Estado. Se ubica en los municipios de Zapopan, Tala, y Tlajomulco, en el Estado de Jalisco, México.

El Bosque La Primavera es considerado como un generador de bienes y servicios ambientales, que aprovechan y disfrutan habitantes de la zona Metropolitana de Guadalajara, gracias al buen estado de conservación de su macizo boscoso funciona como hábitat crítico para especies de flora y fauna representativa de la región, reservorio genético y corredor biológico, asimismo representa valores escénicos y paisajísticos de vital trascendencia que permiten la generación de oportunidades para la implementación y desarrollo de actividades de recreación y ecoturismo, resumiendo el Área Natural es:

- Hábitat para especies de flora y fauna silvestres.
- Protección de cuencas.
- Protección contra la erosión, deslaves y control de la sedimentación.
- Mantenimiento de la diversidad faunística, florística y patrimonio genético.
- Continuidad de los procesos evolutivos.
- Campo para la investigación científica y tecnológica.
- Regulación del clima
- Captación, infiltración, transporte y saneamiento de aguas superficiales y subterráneas.
- Oportunidad para la recreación y el turismo

- Soporte de valores escénicos y paisajísticos

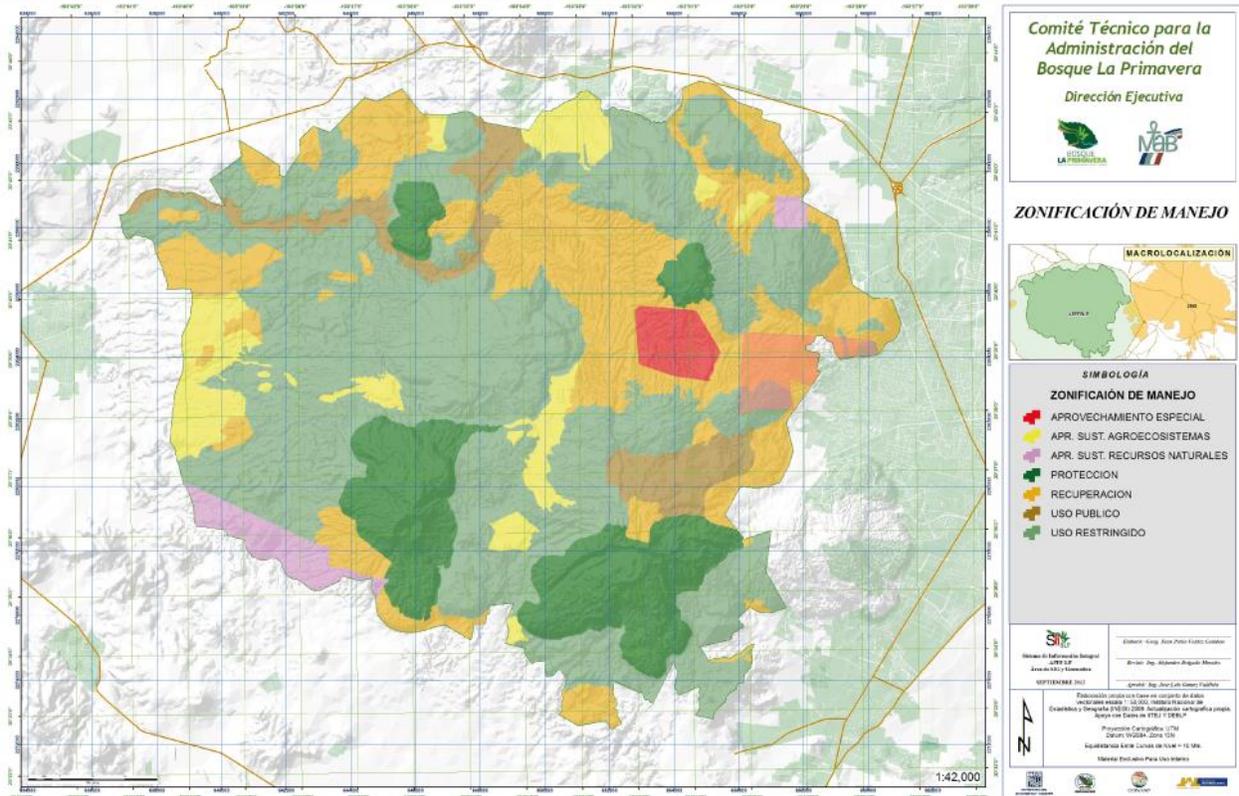


Figura 1.4 Zonificación del Bosque (<http://www.bosquelaprimavera.com/mapa2.php>)

Se han realizado distintas investigaciones relacionadas con el bosque de la primavera, pero una de las más actuales y relacionadas con el tema presente, es el estudio realizado por la Maestra en Ciencias María del Mar (Navarro Farfán, 2019) quien con su tema “Evaluación con cambio climático de escenarios de demanda para las masas subterráneas en los acuíferos asociados al campo geotérmico cerritos colorados” evalúa las afectaciones que sufrirá el bosque de la primavera principalmente en el subsuelo, debidas al cambio climático que existe en la zona.

## 2. MATERIALES Y MÉTODOS

### 2.1 GESTIÓN DE DATOS

La gestión de datos consiste en la recopilación de la información de la zona de estudio, en la cual no se cuenta con la adecuada pesquisa meteorológica, por lo que se hace la búsqueda de estos datos para trabajar con la máxima información posible.

La gestión de datos se divide en dos grupos:

- Los históricos
- Los futuros

Esto es debido a que los datos históricos son los registrados de la zona y los futuros son las series meteorológicas afectadas por el cambio climático.

#### 2.1.1 DATOS HISTÓRICOS

Para poder llevar a cabo la realización de este proyecto es necesario realizar una recopilación de información que sea necesaria para la elaboración de todos los procesos, por lo cual se debe de considerar y analizar cuál será la información a requerirse para la realización de los estudios y saber de dónde se puede obtener.

### 2.1.1.1 INFORMACIÓN METEOROLÓGICA CON CLICOM

La obtención de la información de precipitación y temperatura de la zona es obtenida de las estaciones meteorológicas que se ubican cerca o dentro de la zona de estudio de estudio, para estos datos se recurrirá a la base de datos de Clima Computarizado: Climate Computing Project o (CLICOM, 2018), de las cuales ninguna es del tipo automatizadas, por este motivo los datos históricos de las precipitaciones y temperaturas contienen errores y vacíos, los cuales deben ser correctamente tratados por medio de la generación de series de precipitaciones y temperaturas históricas obtenidas.

### 2.1.1.2 PRESELECCIÓN

Se ubican la mayor cantidad de estaciones meteorológicas existentes dentro de la cercanía espacial, así como por el porcentaje de vacíos que presentan, la cantidad de años en servicio con los que cuenta la estación y su último año de operación.

### 2.1.1.3 SELECCIÓN DE ESTACIONES

De acuerdo a los estándares establecidos de las estaciones existentes se analiza cuáles de ellas cumplen con estas requisitos, para posteriormente ser sometidas a distintas pruebas y obtener cuales estaciones son las que cumplen para nuestro estudio.

Las pruebas que se realizan a las estaciones, son por medio del software Gestión estadística de datos climatológicos (GESTAD), programa elaborado por un Alumno de la Maestría en Ingeniería de los recursos hídricos el cual aplica las siguientes pruebas:

-Pruebas de homogeneidad

- T-Student
- Cramer
- Bartlett

-Pruebas de tendencia

- Pendiente de Regresión
- Spearman
- Mann Kendall

-Pruebas de independencia

- Límites de Anderson
- Wald-Wolfrashausen

#### 2.1.1.4 DEDUCCIÓN DE DATOS FALTANTES

Para poder realizar la modelación hidrológica superficial es necesario tener toda la información completa de las estaciones seleccionadas, por desgracia en México la mayoría de las estaciones cuenta con una gran cantidad de vacíos, o los años de información con los que cuentan son pocos, es por esto que es necesario hacer la deducción de los datos faltantes en estas estaciones para poder trabajar con ellas.

Existen diferentes métodos para el llenado de datos a través de la deducción mediante estaciones cercanas a la incompleta, para este estudio se realizó el llenado de los datos faltantes mediante el programa GESTAD con el cual se aplican distintos procesos para llegar a la mejor calidad de los datos faltantes, ya que al modificar nuestras series se tiene

una afectación hacia los resultados finales, es por esto que se busca que el llenado de estos valores faltantes sea el más adecuado y con menos afectación a nuestra investigación.

### 2.1.2 DATOS FUTUROS

De igual manera como es de gran importancia el saber cuál fue el comportamiento meteorológico en el pasado, es importante saber cuál es el posible comportamiento que se tendrá a futuro, para poder realizar las debidas prevenciones de las afectaciones a nuestra zona de estudio.

Existen algunos Institutos de Investigación que se encargan de generar los datos regionalizados de cambio climático para nuestro país. A partir de la modelación matemática se emplean los Modelos de Circulación General que han sido desarrollados por otros países y mediante herramientas estadísticas se hace la regionalización de los mismos para México. El resultado son series que describen o proyectan los valores de precipitaciones y temperaturas que podrían presentarse en nuestro país para periodos de tiempo futuros. (García Romero , 2015)

Actualmente en México, la mayoría de los estudios acerca del cambio climático se hacen utilizando el modelo Ensemble, que como su nombre lo dice resulta de una combinación de 15 MCG, que regionalizados para nuestro país, dan la información de precipitaciones y temperaturas proyectadas a futuro. Estas herramientas son desarrolladas por el Centro de Investigación Científica y de Educación Superior de Ensenada, B.C, (CICESE), el Instituto Mexicano de Tecnología del Agua (IMTA) y el Centro de Ciencias de la Atmósfera (CCA-UNAM) en coordinación con el Instituto Nacional de Ecología (INE) ahora Instituto Nacional de Ecología y Cambio Climático (INECC), financiado por el fondo del Medio Ambiente Mundial (GEF, por sus siglas en inglés) y administrado por el Programa de las Naciones Unidas para el Desarrollo (PNUD). Lo anterior, en el marco del estudio

denominado “Actualización de Escenarios de Cambio Climático para México como parte de los productos de la Quinta Comunicación Nacional”.

Las series de cambio climático puestas a disposición de los investigadores y del público en general por parte del Instituto Nacional de Ecología y Cambio Climático (INECC, 2018), son datos que han sido desarrollados con herramientas desarrolladas en otros países y regionalizados para poder utilizarlos en México.

Para obtener las series de modelación afectadas por la variable de cambio climático, es necesario encontrar una anomalía de precipitación o temperatura (según sea el caso) que está afectando a cada dato de la serie, por ello debe determinarse la anomalía para cada escenario RCP (4.5, 6.0 y 8.5) y, para cada uno de los doce meses del año.

#### 2.1.2.1 ESCENARIOS RCP

Las proyecciones de los cambios en el sistema climático se elaboran empleando una jerarquía de modelos climáticos, que van de modelos climáticos sencillos a otros integrales, pasando por modelos de complejidad intermedia, así como modelos del sistema Tierra. Esos modelos simulan cambios basados en un conjunto de escenarios de forzamientos antropógenos. Para las nuevas simulaciones de modelos climáticos, realizados en el marco de la quinta fase del Proyecto de comparación de modelos acoplados (CMIP5) del Programa Mundial de Investigaciones Climáticas, se ha utilizado un nuevo conjunto de escenarios: las trayectorias de concentración representativas (RCP). En todas las RCP, las concentraciones atmosféricas de CO<sub>2</sub> son más elevadas en 2100 respecto de hoy en día, como resultado de un mayor aumento de las emisiones de CO<sub>2</sub> acumuladas en la atmósfera durante el siglo XXI. (García Romero , 2015)

La abreviación RCP de los nuevos escenarios significa: Trayectorias de Concentraciones Representativas (RCP, por siglas en inglés). Estos escenarios se dividen en cuatro grupos:

RCP 2.6, RCP 4.5, RCP 6.0 y RCP 8.5, que se refieren a la radiación global de energía expresada en  $W/m^2$ . Sus características se muestran en la tabla 2-1.

Tabla 2-1 Escenarios RCP. (Cavazos, 2013)

Nombre	Forzamiento radiativo	Concentración (p.p.m.)	Trayectoria	Modelo que provee el RCP
RCP 8.5	$>8.5 W/m^2$ en 2100	$>1,370 CO_2$	Aumentando	MESSAGE (Austria)
RCP 6.0	$6 W/m^2$ estable después de 2100	$850 CO_2$ estable después de 2100	Estable sin pararse	AIM (Japón)
RCP 4.5	$4.5 W/m^2$ estable después de 2100	$650 CO_2$ estable después de 2100	Estable sin pararse	GCAM (EU)
RCP 2.6	Pico en $3 W/m^2$ antes de 2100 y disminuye después	Pico en $490 CO_2$ antes de 2100 y disminuye después	Aumenta y posteriormente disminuye	IMAGE (Países bajos)

## 2.2 ÍNDICES DE SEQUÍA

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

Los índices suelen ser representaciones numéricas informatizadas de la gravedad de las sequías, determinadas mediante datos climáticos o hidrometeorológicos, entre los que se incluyen los indicadores enumerados. Tienen por objeto analizar el estado cualitativo de las sequías en el entorno en un período de tiempo determinado. Desde el punto de vista técnico, los índices también son indicadores. Vigilar el clima en diversas escalas temporales permite reconocer los períodos húmedos de corta duración dentro de las sequías de larga duración

o los períodos secos de corta duración compleja y brindar valiosos instrumentos para la comunicación con distintos públicos y usuarios, incluida la población general. Se utilizan para proporcionar un estudio cuantitativo de la gravedad, la localización, el desarrollo cronológico y la duración de los episodios de sequía. La gravedad se refiere a la desviación de la normalidad de un índice. Se puede establecer un umbral de gravedad a fin de determinar el momento en que una sequía ha comenzado, el momento en que ha terminado y la zona geográfica afectada. La localización se refiere a la zona geográfica en la que se registran las condiciones de sequía. Las fechas aproximadas de inicio y cese fijan el desarrollo cronológico y la duración. Los efectos vienen determinados por la interacción del fenómeno peligroso y los elementos expuestos (población, zonas agrícolas, embalses y sistemas de abastecimiento de agua), y las vulnerabilidades de esos elementos a las sequías. Las vulnerabilidades pueden haberse agravado por sequías precedentes que tal vez provocaron la venta de activos productivos para satisfacer las necesidades inmediatas, por ejemplo. El desarrollo cronológico de una sequía puede tener tanta relevancia como su gravedad en el diagnóstico de los efectos y las consecuencias. Una sequía interestacional breve y de gravedad relativamente baja, en caso de que se produzca durante el período de sensibilidad a la humedad de un cultivo estable, puede tener un efecto más devastador en el rendimiento de la cosecha que una sequía más prolongada y grave registrada en un momento menos crucial del ciclo agrícola. En consecuencia, los índices de sequía, junto con la información complementaria sobre los activos expuestos y sus características relativas a la vulnerabilidad, son esenciales para seguir y prever los efectos y las consecuencias de las sequías. Hay índices que también pueden cumplir otra función esencial, en el sentido de que pueden facilitar una referencia histórica a los planificadores o las instancias decisorias. (OMM, 2016)

A continuación se presentan los índices que maneja la OMM con sus respectivas etiquetas de uso:

Verde - Se asigna el color verde a un índice si cumple al menos uno de los siguientes criterios:

- Existe un código o programa de fácil acceso y de libre utilización para ejecutar el índice.
- No hacen falta datos diarios.
- Se puede ejecutar aunque falten datos.
- El producto del índice ya se genera de forma operativa y se puede consultar en línea.

Nota: Aunque el color verde asignado a un indicador o índice puede significar que sea el más sencillo de conseguir o utilizar, esto no implica que sea el idóneo para una determinada región o lugar. La decisión respecto de los indicadores o índices que se utilizarán tiene que ser tomada por el usuario y depende de las aplicaciones concretas.

Amarillo - Se asigna el color amarillo a un índice si cumple al menos uno de los siguientes criterios:

- Hacen falta distintas variables o datos de entrada para los cálculos.
- Hay un código o programa para ejecutar el índice que no es del dominio público.
- Es posible que solo se necesite un dato de entrada o variable, pero no hay ningún código disponible.
- La complejidad de los cálculos necesarios para producir el índice es mínima.

Rojo - Se asigna el color rojo a un índice si cumple al menos uno de los siguientes criterios:

- Sería necesario desarrollar un código para calcular el índice a partir de la metodología presentada en los trabajos publicados.
- El índice o los productos derivados no son de fácil acceso.

- El índice es poco claro y no se emplea de forma generalizada, pero se puede utilizar.
- El índice contiene datos modelados o forma parte de los cálculos.

Leyenda de las variables:

AS = aguas subterráneas,

CAD = contenido de agua disponible,

CC = coeficiente de cultivo,

CF = caudales fluviales,

CS = cobertura del suelo,

DC = datos de cultivos,

DHS = déficit hídrico del suelo,

EM = embalse,

ER = ecorregión,

ET = evapotranspiración,

ETP = evapotranspiración potencial,

MN = manto de nieve,

Mod = modelado,

P = precipitación,

Rad = radiación solar,

Sat = satélite,

T = temperatura,

TPR = temperatura del punto de rocío,

TS = tipo de suelo,

V = datos sobre el viento,

Varios = varios indicadores.

Tabla 2-2 Indicadores e índices Meteorológicos manual de la OMM

Meteorología	Facilidad de uso	Parámetros de entrada	Información adicional
Índice de anomalía de la aridez (AAI)	Verde	P, T, ETP, ET	Disponible con fines operativos para India
Deciles	Verde	P	Fácil de calcular; los ejemplos de Australia resultan útiles
Índice de sequía de Keetch-Byram (KBDI)	Verde	P, T	Los cálculos se basan en el clima de la zona de interés
Porcentaje de precipitación habitual	Verde	P	Cálculos sencillos
Índice normalizado de precipitación (SPI)	Verde	P	Marcado por la OMM como punto de partida para la vigilancia de sequías
Anomalía ponderada y normalizada de la precipitación (WASP)	Verde	P, T	Utiliza datos reticulares para vigilar la sequía en regiones tropicales
Índice de aridez (AI)	Amarillo	P, T	También se puede utilizar en clasificaciones climáticas
Índice Z de China (CZI)	Amarillo	P	Concebido para mejorar los datos del SPI
Índice de humedad de los cultivos (CMI)	Amarillo	P, T	Se necesitan valores semanales
Índice de zonas de sequía (DAI)	Amarillo	P	Ofrece un indicio de la evolución en la estación del monzón
Índice de reconocimiento de sequías (DRI)	Amarillo	P, T	Se necesitan valores mensuales de temperatura y precipitación
Índice de sequía efectiva (EDI)	Amarillo	P	Programa disponible mediante contacto directo con el autor
Coefficiente hidrotérmico de Selyaninov (HTC)	Amarillo	P, T	Cálculos fáciles y varios ejemplos de la Federación de Rusia
Índice de sequía de la NOAA (NDI)	Amarillo	P	Es mejor utilizarlo en aplicaciones agrícolas
Índice de severidad de sequía de Palmer (PDSI)	Amarillo	P, T, CAD	No se le ha asignado el color verde debido a la complejidad de los
Índice Z de Palmer	Amarillo	P, T, CAD	Uno de los numerosos productos de los cálculos del PDSI
Índice de anomalía pluviométrica (RAI)	Amarillo	P	Se necesitan datos de series completas
Índice autocalibrado de severidad de sequía de Palmer (sc-PDSI)	Amarillo	P, T, CAD	No se le ha asignado el color verde debido a la complejidad de los
Índice normalizado de anomalías (SAI)	Amarillo	P	Se utilizan datos puntuales para describir las condiciones regionales
Índice estandarizado de precipitación y evapotranspiración	Amarillo	P, T	Se necesitan datos de series completas; productos similares al SPI, pero con
referencia para la agricultura (ARID)	Rojo	P, T, Mod	Producido en el sureste de Estados
para cultivos (CSDI)	Rojo	P, T, TPR, V,	Se necesitan datos de calidad de
reclamaciones por sequía (RDI)	Rojo	P, T, MN,	Similar al Índice del abastecimiento de las

Tabla 2-3 Indicadores e índices de Humedad del suelo manual de la OMM

Humedad del suelo	Facilidad	Parámetros	Información adicional de uso de entrada
Anomalía de la humedad del suelo (SMA)	Amarillo	P, T, CAD	Concebido para mejorar el balance hídrico del PDSI
Índice del déficit de evapotranspiración (ETDI)	Rojo	Mod	Cálculos complejos para los que son precisos varios datos de entrada
Índice del déficit de humedad del suelo (SMDI)	Rojo	Mod	Cálculos semanales a distintas profundidades del suelo; difícil de calcular
Almacenamiento de agua del suelo (SWS)	Rojo	CAD, EM, TS, DHS	Debido a variaciones en los tipos de suelo y cultivo, la interpolación en zonas extensas resulta difícil

Tabla 2-4 Indicadores e índices de Hidrología manual de la OMM

Hidrología	Facilidad de uso	Parámetros de entrada	Información adicional
Índice de sequía hidrológica de Palmer (PHDI)	Amarillo	P, T, CAD	Se necesitan datos de series completas
Índice normalizado del suministro de embalses (SRSI)	Amarillo	RD	Cálculos similares al SPI con datos de embalses
Índice normalizado de los caudales fluviales (SSFI)	Amarillo	SF	Utiliza el programa del SPI junto con datos sobre los caudales fluviales
Índice normalizado del nivel del agua (SWI)	Amarillo	GW	Cálculos similares a los del SPI, pero utilizando datos sobre las aguas subterráneas o del nivel de los pozos en lugar de datos de precipitación
Índice de sequía de los caudales fluviales (SDI)	Amarillo	SF	Cálculos similares a los del SPI, pero utilizando datos sobre los caudales fluviales en lugar de datos de precipitación
Índice del abastecimiento de las aguas superficiales (SWSI)	Amarillo	P, EM, CF, MN	Se pueden utilizar muchas metodologías y productos derivados, pero las comparaciones entre cuencas están sujetas al método elegido
Índice agregado de sequía (ADI)	Rojo	P, ET, CF, EM, CAD, MN	Carece de código, pero las cuestiones matemáticas están explicadas en las publicaciones correspondientes
Índice normalizado de la fusión de la nieve y la lluvia (SMRI)	Rojo	P, T, CF, Mod	Se puede utilizar con o sin información sobre el manto de nieve

Tabla 2-5 Indicadores e índices de Teledetección manual de la OMM

Teledetección	Facilidad de uso	Parámetros de entrada	Información adicional
Índice mejorado de la vegetación (EVI)	Verde	Sat	No distingue entre el estrés ocasionado por la sequía y otros tipos de estrés
Índice de estrés por evaporación (ESI)	Verde	Sat, ETP	No tiene un amplio historial como producto operativo
Índice diferencial normalizado de vegetación (NDVI)	Verde	Sat	Se calcula para la mayoría de los lugares
Índice de las condiciones de temperatura (TCI)	Verde	Sat	Aparece generalmente junto con los cálculos del NDVI
Índice de condiciones de la vegetación (VCI)	Verde	Sat	Aparece generalmente junto con los cálculos del NDVI
Índice de respuesta a la sequía de la vegetación (VegDRI)	Verde	Sat, P, T, CAD, LC, ER	Tiene en cuenta muchas variables para diferenciar entre el estrés ocasionado por la sequía y otros tipos de estrés
Índice de salud de la vegetación (VHI)	Verde	Sat	Una de las primeras tentativas de vigilar la sequía con datos por teledetección
Índice de satisfacción de la demanda de agua (WRSI) y WRSI geoespacial	Verde	Sat, Mod, CC	Operativo para muchos lugares
Índice diferencial de agua normalizado (NDWI) e Índice de agua en la superficie terrestre (LSWI)	Verde	Sat	Producido operativamente con los datos de espectrorradiómetros de imagenización de resolución moderada
Índice de vegetación ajustado al suelo (SAVI)	Rojo	Sat	No producido operativamente

Tabla 2-6 Indicadores e índices Mixtos manual de la OMM

Mixtos o modelados	Facilidad de uso	Parámetros de entrada	Información adicional
Indicador combinado de sequía (CDI)	Verde	Mod, P, Sat	Utiliza datos de observación en superficie y datos obtenidos por teledetección
Sistema mundial integrado de vigilancia y predicción de sequías (GIDMaPS)	Verde	Multiple, Mod	Producto operativo con un resultado global de tres índices de sequía: Índice normalizado de la humedad del suelo, SPI e Índice normalizado de sequía con múltiples variables
Sistema mundial de asimilación de datos de la superficie terrestre (GLDAS)	Verde	Multiple, Mod, Sat	Útil en regiones de las que se dispone de escasos datos gracias a su alcance mundial
Índice estandarizado de sequía de múltiples variables (MSDI)	Verde	Multiple, Mod	Disponible, pero es necesaria labor de interpretación
Vigilancia de la sequía en Estados Unidos (USDM)	Verde	Multiple	Disponible, pero es necesaria labor de interpretación

Nota: Los indicadores e índices están ordenados según su facilidad de uso, en primer lugar, y alfabéticamente, por su nombre en inglés, dentro de cada categoría de facilidad de uso.

Para la presente investigación se trabaja con el SPI que es el propuesto por la OMM

### 2.2.1 ÍNDICE NORMALIZADO DE PRECIPITACIÓN (SPI).

Origen: Resultado de las investigaciones y el trabajo desarrollados en 1992 en la Universidad del Estado de Colorado Estados Unidos por McKee y otros. El resultado de su trabajo se presentó por primera vez en la 8ª Conferencia sobre Climatología Aplicada, celebrada en enero de 1993. La base de este índice es que se sustenta en las relaciones de la sequía con la frecuencia, la duración y las escalas temporales.

En 2009, la OMM recomendó a los países que utilizaran el SPI como principal índice de la sequía meteorológica para vigilar y seguir las condiciones de sequía (Hayes, 2011). Al dar a conocer el SPI como índice de uso general, la OMM brindó orientación a los países que pretendían establecer un nivel para la alerta temprana de sequías.

Características: Utiliza registros históricos de la precipitación de un lugar para establecer una probabilidad de precipitación que se puede calcular para las escalas temporales que se deseen, desde un mes hasta 48 meses o más. Como ocurre con otros indicadores climáticos, las series cronológicas de datos utilizadas para calcular el SPI no tienen que tener una duración específica. (Guttman N. , 1998) Señaló que si hay datos adicionales presentes en una serie cronológica larga, los resultados de la distribución de la probabilidad serán más fiables porque habrá más episodios de humedad y sequía extrema incluidos (Guttman N. , 1999). El SPI se puede calcular a partir de un registro mínimo de datos de 20 años, pero lo ideal es que la serie cronológica contenga datos de 30 años, al menos, aunque haya datos ausentes.

El SPI tiene una escala de intensidad en la que se calculan valores positivos y negativos, que se correlacionan directamente con episodios de humedad y sequía. En cuanto a la sequía, los extremos de la distribución de la precipitación despiertan mucho interés, especialmente los episodios de sequía extrema, que son los episodios que se consideran infrecuentes para el clima de la región analizada.

Se denotan episodios de sequía cuando los resultados del SPI, independientemente de la escala temporal que se analice, son continuamente negativos y alcanzan el valor de -1. Se considera que el episodio de sequía sigue en curso hasta que el SPI alcanza un valor de 0. McKee y otros (McKee, 1993) señalan que la sequía comienza cuando el SPI es igual a -1 o inferior, pero no hay ningún criterio establecido, dado que algunos investigadores elegirán un umbral inferior a 0, pero este quizá no sea -1, mientras que otros clasificarán inicialmente la sequía a valores inferiores a -1.

Debido a la utilidad y flexibilidad del SPI, este índice puede calcularse con datos ausentes del período del registro de un lugar. En teoría, la serie cronológica debe ser lo más completa posible, pero los cálculos del SPI devolverán un valor “nulo” si no hay datos suficientes para calcular un valor, y el SPI comenzará a calcular el producto de nuevo cuando los datos estén disponibles. El SPI suele calcularse para escalas de 24 meses como máximo, y la flexibilidad del índice posibilita numerosas aplicaciones en relación con fenómenos que influyen en la agricultura, los recursos hídricos y otros sectores.

Parámetros de entrada: Precipitación.

El SPI, se basa en registros de lluvia y fue diseñado para ser un indicador espacial de la sequía; puede calcularse con distintas escalas de tiempo. En períodos cortos (meses) puede ser útil para el manejo agrícola, mientras que períodos largos (años), los resultados pueden ser importantes para el suministro de agua (Guttman N. , 1999). El SPI se calcula a partir de datos de precipitación mensual y se recomienda usarlo para un período continuo de al menos 30 años. Las escalas temporales más usuales son de 3, 6, 12, 24 ó 48 meses. Por

ejemplo, para anomalías de lluvia relacionados con variabilidad intraestacional se recomienda usar SPI-3 o SPI-6, mientras que para sequías persistentes se puede usar SPI-24 o SPI-48 (Méndez & Magaña, 2010)

Para la evaluación del SPI se utiliza la siguiente fórmula (Agnew, 2000)

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

Dónde:

$\sigma_i$  = Desviación estándar de estación observada.

$X_{ik}$  = Precipitación de la estación observada y observación histórica.

$X_i$  = Precipitación media de la estación observada.

### 2.3 SECUENCIAS DE AÑOS SECOS Y AÑOS HÚMEDOS

En su libro fundamentos de hidrogeología (Martínez Alfaro, Martínez Santos, & Castaño Castaño, 2005) nos mencionan que es necesario, a la hora de valorar e interpretar las aportaciones de agua a una cuenca como consecuencia de la precipitación, conocer dentro de qué tipo de secuencia se encuadran esas aportaciones. Para ello se puede utilizar la llamada curva de desviaciones acumuladas con respecto a la media.

Siguiendo la metodología de Alfaro y otros (2005) se obtiene una gráfica en la que los tramos en los que la pendiente tiene tendencia positiva corresponden a secuencias húmedas de la serie pluviométrica, siendo el grado de humedad mayor a mayor pendiente del tramo. Los tramos con pendiente negativa se corresponden con secuencias secas y el grado de sequedad será mayor a mayor pendiente. Los tramos en los que la pendiente tiende a ser

nula señalan secuencias con precipitación en torno a la media. Los años marcados en el eje de abscisas señalan el inicio, el final y la duración de cada secuencia.

En la Figura 2.1 nos muestran como evaluar los cambios de pendiente para saber si nuestros años se encuentran en secuencias secas o húmedas

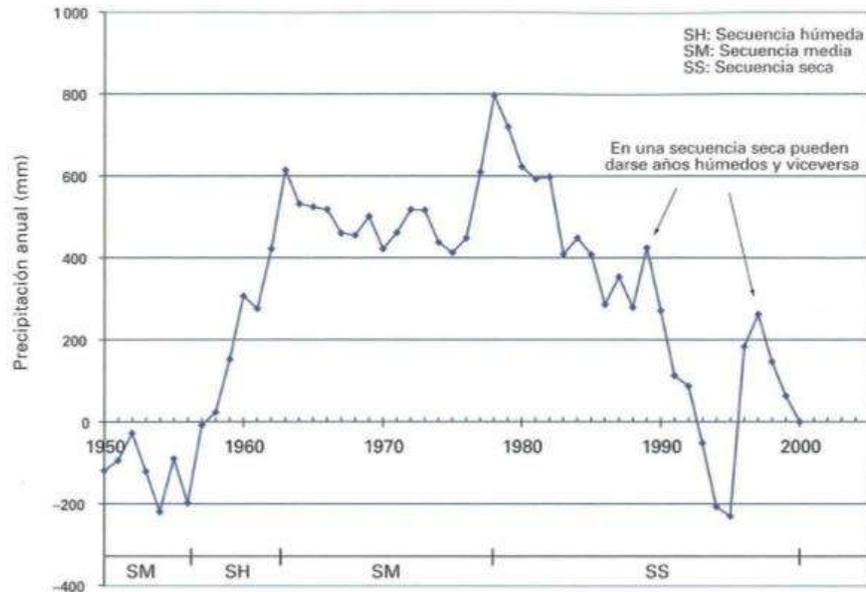


Figura 2.1 Ejemplo de Curva de desviaciones acumuladas de precipitación (Martínez Alfaro, 2005)

## 2.4 DISTRIBUCIÓN ESPACIAL

La aplicación de las sequías tanto históricas como futuras se realiza mediante la aplicación de modelos de distribución espacial para poder apreciar el fenómeno de sequía sobre la superficie terrestre con una visualización gráfica.

Para realizar este tipo de distribuciones se realiza la modelación mediante el programa ArcGIS aplicando los valores a las estaciones meteorológicas georreferenciadas en estudio para la creación de los mapas de sequías.

### 3. RESULTADOS

A continuación se presentan los resultados obtenidos mediante esta investigación, así como el proceso que se siguió para la obtención de los mismos.

#### 3.1 ANÁLISIS DE LA ZONA DE ESTUDIO

En la Figura 3.1 se puede apreciar la delimitación del bosque La Primavera así como los municipios en los que se encuentra

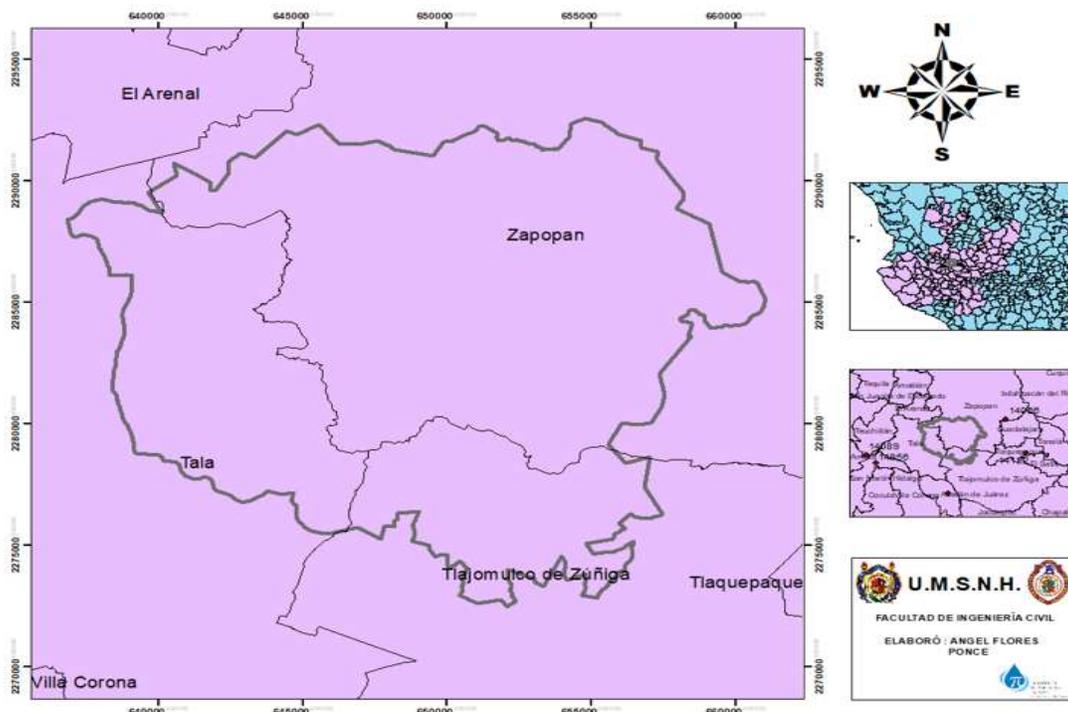


Figura 3.1 Delimitación del Bosque La Primavera

La extensión total del área de estudio del bosque La Primavera comprende 40 000, de las cuales 35 000 ha conforman el Área de Protección de Flora y Fauna La Primavera, esta zona ha tenido una gran variedad de estudios debido a su importancia, pero sin embargo

son pocos los estudios y escasa información con respecto a sus recursos hídricos, por lo que se vuelve de gran importancia realizar más de estos estudios, así como de las afectaciones por el cambio climático que se presentan en el bosque La Primavera.

Actualmente el Bosque la Primavera se encuentra bordeada por poblaciones de gran impacto social, económico, político y cultural, generando una gran presión a su conservación (Gobierno de Jalisco, 2019)

La extensión territorial del bosque esta entre los municipios:

- Zapopan
- Tala
- Tlajomulco de Zúñiga

El bosque La Primavera se encuentra entre las cuencas hidrológicas:

- Rio Santiago Guadalajara
- Lago Chapala
- La Vega – Cocula

Datos del bosque:

- Extensión: 30 500 ha aunque con la construcción de fraccionamientos, la tala inmoderada y los últimos incendios ha quedado poco menos de 20 mil
- Fecha de Decreto :6 de marzo de 1980
- Ubicación: 20°37'59.25"N 103°33'35.37"O
- Región Fisiográfica: cordillera Neovolcánica.
- Ecosistema Protegido: bosque de encino y pino, matorrales.
- Biodiversidad: 1 000 especies de plantas, 135 especies de aves
- Tipo de Vegetación: bosque de pino; bosque de pino-encino; bosque de encino; bosque de encino-pino; bosque tropical caducifolio; pastizal.
- Productividad de agua: 240 millones de m<sup>3</sup> de agua al año.

### 3.2 PRESELECCIÓN DE ESTACIONES.

Se identificaron las estaciones meteorológicas cercanas al Bosque La Primavera, para lo cual se tomó un radio de 80 km del centro de gravedad del bosque, para que una vez localizadas las estaciones se realizara la correcta descarga de información mediante la plataforma de CLICOM para obtener los registros históricos tanto de precipitación como de temperatura.

Como se muestra en la Tabla 3-1 se ubicaron las estaciones meteorológicas dentro del rango en estudio.

*Tabla 3-1 Ubicación de las Estaciones en un radio de 80 km*

Ubicación de estaciones				
Criterio		Clave	Rangos	
Dentro	8000	1	0	8000
Fuera	<40000	2	8000	40000
	40000>60000	3	40000	60000
	60000>80000	4	60000	80000
	>80000	5	80000	100000

Mediante este criterio quedaron 95 estaciones para ser analizadas

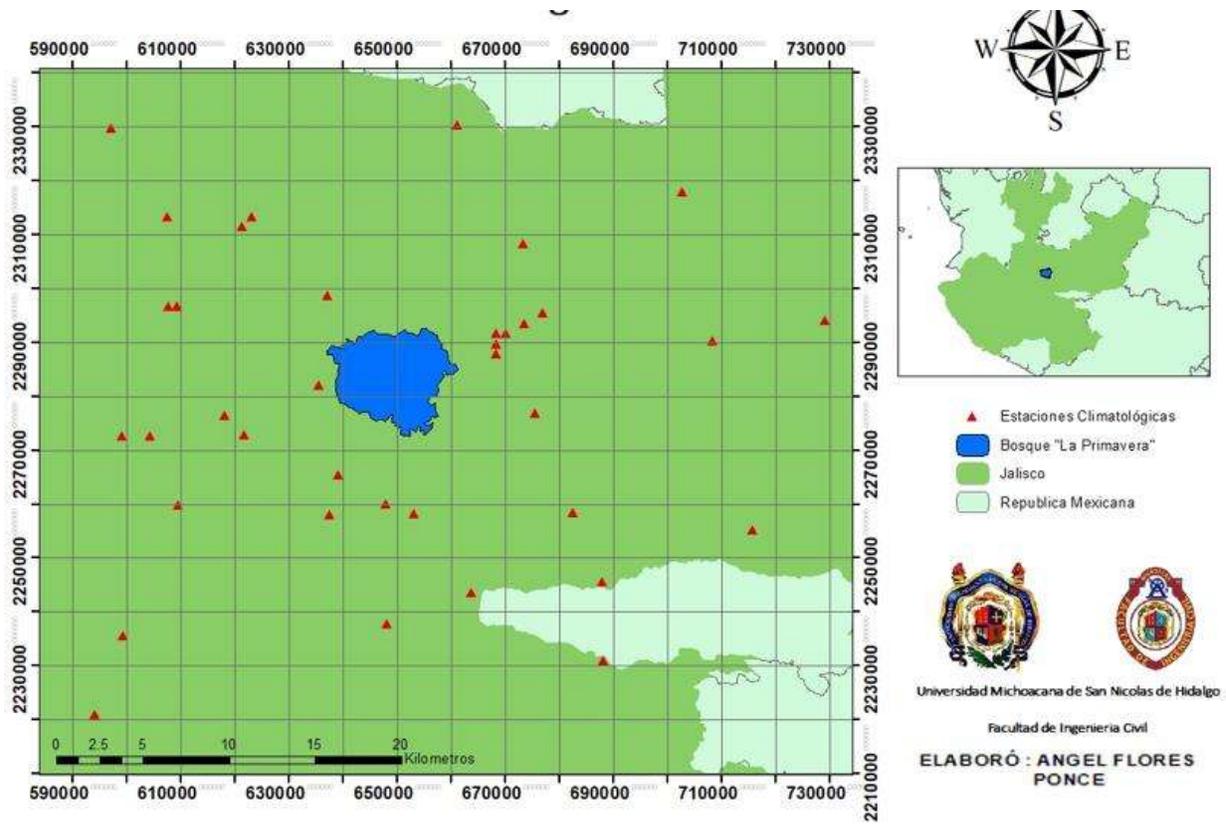


Figura 3.2 Distribución espacial de las posibles estaciones meteorológicas

A continuación en la Tabla 3-2 se muestran las 95 posibles estaciones de trabajo

Tabla 3-2 Preselección de estaciones meteorológicas

Código	Nombre	x	y	z	Distancia aprox (m)
14001	ACATIC (SMN), JAL	718576.8	2301436.2	1678.0	73629.58124
14002	ACATLAN DE JUAREZ, JAL	646084.9	2256368.5	1370.0	26857.49411
14008	AMACUECA, JAL	646458.6	2212093.4	1439.0	71112.00425
14009	AMECA, JAL	604275.0	2267131.6	1230.0	45872.71505

14010	ANTONIO ESCOBEDO (SMN), JAL	604070.6	2300335.9	1481.0	46446.58015
14012	EL ARENAL (SMN), JAL	635295.4	2300558.5	1603.0	21070.75447
14013	ATEMAJA DE BRIZUELA, JAL	635909.7	2223077.3	2320.0	61182.26611
14014	ATENGO (SMN), JAL	573085.3	2244834.8	1479.0	83492.75908
14018	ATOYAC, JAL	656921.7	2212184.0	1350.0	71673.87561
14029	CONCEPCION DE BUENOS AIRES, JAL	677849.0	2212383.9	1639.0	77148.72313
14038	CUIXTLAN, JAL	666191.2	2334050.5	1000.0	54265.74942
14039	CUQUIO, JAL	708027.5	2312376.0	1790.0	67425.317
14040	CHAPALA, JAL	687953.8	2245704.4	1530.0	55349.20591
14041	CHIQUILISTLAN, JAL	614998.3	2222926.8	1700.0	68356.29411
14055	INGENIO EL REFUGIO, JAL	635384.4	2289489.4	1300.0	13420.94186
14056	EL SALITRE, JAL	614703.4	2267198.5	1260.0	36259.87618
14057	EL SALTO, JAL	687711.2	2267845.7	1508.0	43285.39473
14063	ETZATLAN (SMN), JAL	593662.9	2300274.6	1380.0	56232.7058
14064	EX HACIENDA SAN DIEGO, JAL	625293.8	2245135.1	1388.0	43939.73081
14065	GUADALAJARA (OBS), JAL	666632.5	2289769.0	1551.0	20473.58256
14066	GUADALAJARA (DGE), JAL	677049.2	2289875.0	1550.0	30546.19008
14068	HOSTOTIPAQUILLO, JAL	593476.4	2333479.3	1300.0	73610.66233
14072	HUERTA VIEJA, JAL	687832.8	2256775.0	1550.0	48435.86469
14073	IXTLAHUACAN DE L RIO, JAL	676815.9	2312016.4	1825.0	41291.59992
14077	JOCOTEPEC, JAL	667065.6	2245489.3	1540.0	42605.10092
14078	JUCHITLAN, JAL	594088.1	2222801.3	1230.0	80457.23472
14082	LA ESTANZUELA, JAL	624969.0	2289409.0	1269.0	23120.98628
14086	LA MANZANILLA DE LA PAZ, JAL	688313.3	2212493.2	2050.0	81771.27215
14087	LA RED, JAL	729139.7	2290501.9	1746.0	82223.46832
14088	LA SOLEDAD, JAL	666412.8	2311909.5	1060.0	34521.44472
14089	LA VEGA, JAL	614628.8	2278266.8	1260.0	32983.37316
14093	MAGDALENA, JAL	604001.8	2311404.2	1380.0	51624.05705
14102	OCOTLAN, JAL	729587.6	2257283.3	1530.0	86328.99217
14104	PALO VERDE, JAL	708438.4	2279159.9	1730.0	61330.68615
14105	PASO DE ANALCO (CFE), JAL	603863.4	2333541.3	880.0	66451.12428
14107	PASO DE LA YESCA, JAL	593413.6	2344547.8	420.0	81613.76472
14110	PLAN DE BARRANCAS, JAL	583145.1	2322355.7	830.0	75109.03473
14111	PONCITLAN, JAL	719148.2	2257146.7	1520.0	76481.87479

14113	PRESA HURTADO, JAL	646084.9	2256368.5	1400.0	26857.49411
14115	PUENTE ARCEDIANO (CFE), JAL	677049.2	2289875.0	1015.0	30546.19008
14121	GUADALAJARA (SMN), JAL	666632.5	2289769.0	1567.0	20473.58256
14130	SAN MARTIN HIDALGO, JAL	614777.7	2256130.4	1300.0	42269.23994
14132	TLAQUEPAQUE, JAL	677165.1	2278804.5	1540.0	30245.36084
14136	SANTA ROSA, JAL	635205.9	2311627.7	1059.0	30869.3249
14143	TECOLOTLAN (DGE), JAL	604476.5	2233928.4	1200.0	65242.63503
14146	TEOCUITATLAN, JAL	667279.1	2223350.2	1370.0	63116.20776
14147	TEPATITLAN, JAL	728988.9	2301575.0	1800.0	83787.34604
14149	TIZAPAN EL ALTO (SMN), JAL	698525.6	2234750.5	1550.0	70551.90173
14154	TOTOTLAN, JAL	729439.0	2268356.0	1540.0	83527.76902
14156	TUXCUECA	688074.2	2234633.9	1530.0	63451.73865
14162	PRESA SANTA ROSA (CFE), JAL	635205.9	2311627.7	790.0	30869.3249
14163	VILLA CORONA, JAL	635648.9	2256282.8	1355.0	29308.21826
14168	ZOCOALCO DE TORRES, JAL	646272.6	2234230.7	1350.0	48979.97422
14169	ZAPOPAN, JAL	666632.5	2289769.0	1560.0	20473.58256
14171	ZAPOTLANEJO (SMN), JAL	698013.5	2279035.0	1515.0	50943.13639
14173	ATEQUIZA NORMAL RURAL, JAL	698270.8	2256892.5	1521.0	57412.39345
14183	SAN MARCOS, JAL	583255.3	2300219.8	1380.0	66210.31607
14184	TAPALPA (DGE), JAL	625612.5	2200863.2	2060.0	85131.20338
14185	TECOLOTLAN (SMN), JAL	594028.2	2233868.6	1200.0	72562.37069
14187	TEQUILA, JAL	624804.3	2311546.7	1180.0	36150.77518
14188	TEUCHITLAN, JAL	624969.0	2289409.0	1260.0	23120.98628
14189	TIZAPAN EL ALTO (DGE), JAL	708977.5	2234873.3	1550.0	78402.6255
14195	ANTONIO ESCOBEDO (DGE), JAL	604070.6	2300335.9	1360.0	46446.58015
14269	AHUALULCO DE MERCADO (SMN), JAL	604139.1	2289267.7	1340.0	43526.74372
14276	BARRANCAS (FFCC), JAL	583145.1	2322355.7	1300.0	75109.03473
14277	ETZATLAN (FFCC), JAL	593662.9	2300274.6	1385.0	56232.7058
14278	EMPALME DE ORENDAIN (FFCC), JAL	645800.0	2289576.1	1460.0	6535.832464
14279	GUADALAJARA (FFCC), JAL	666632.5	2289769.0	1549.0	20473.58256
14281	LA VEGA (FFCC), JAL	614628.8	2278266.8	1250.0	32983.37316
14287	E.T.A. 135 PACANA, JAL	625050.7	2278340.4	1288.0	22716.42178
14292	ESCUELA DE AGRICULTURA, JAL	666632.5	2289769.0	1600.0	20473.58256
14294	TLAJOMULCO DE ZUÑIGA, JAL	666850.0	2267628.9	1560.0	25040.09373

14295	UNIVERSIDAD AUTONOMA DE GUADALAJARA, JAL	666632.5	2289769.0	1570.0	20473.58256
14301	TENAMAXTLAN, JAL	583580.1	2233815.0	1470.0	80571.06839
14307	ACATIC (DGE), JAL	718576.8	2301436.2	1680.0	73629.58124
14314	ETZATLAN (DGE), JAL	593662.9	2300274.6	1400.0	56232.7058
14316	GUACHINANGO (DGE), JAL	562522.8	2277994.8	1489.0	84878.02408
14323	TECHALUTA, JAL	646365.8	2223162.0	1406.0	60045.47863
14329	LA EXPERIENCIA, JAL	677049.2	2289875.0	1550.0	30546.19008
14333	AHUALULCO DE MERCADO (DGE), JAL	604139.1	2289267.7	1340.0	43526.74372
14337	APOZOL, JAL	728685.4	2323721.6	1698.0	90967.5833
14338	EL ARENAL (DGE), JAL	635295.4	2300558.5	1380.0	21070.75447
14351	TALA, JAL	635472.9	2278420.4	1330.0	12702.09707
14356	LA CAÑADA, JAL	666958.1	2256559.0	1625.0	33144.61532
14362	SAN LUCAS EVANGELISTA, JAL	677395.2	2256663.8	1560.0	40168.44619
14368	USMAJAC, JAL	657020.6	2201115.1	1360.0	82666.51058
14373	AGUA PRIETA, JAL	676932.8	2300945.6	1380.0	34590.03133
14377	LA PRIMAVERA, JAL	625213.1	2256203.4	1295.0	34843.99781
14379	MEZCALA, JAL	708843.7	2245944.8	1530.0	71992.53112
14380	SAN LUIS, JAL	645990.4	2267437.6	1560.0	15813.03047
14386	TONALA, JAL	687589.1	2278916.6	1660.0	40574.94441
14388	ZAPOTLANEJO (DGE), JAL	698013.5	2279035.0	1515.0	50943.13639
14391	PRESA EL VOLANTIN, JAL	698652.1	2223679.6	1890.0	78650.55731
14396	PIEDRA BARRENADA, JAL	667065.6	2245489.3	1530.0	42605.10092
14397	PRESA CALDERON, JAL	708302.1	2290231.8	1620.0	61464.53185

Ya ubicadas las estaciones se procedió a realizar un procesamiento de la información para un primer filtro de estaciones mediante criterios como cercanía a la zona de estudio, porcentaje de vacíos, periodo de años y el año del último registró, esto para buscar contar con la mayor cantidad de información actual y buena.

Tabla 3-3 Criterio de ubicación de estaciones

Ubicación de estaciones				
	Criterio	Clave	Rangos	
Dentro	8000	1	0	8000
Fuera	<40000	2	8000	40000
	40000>60000	3	40000	60000
	60000>80000	4	60000	80000
	>80000	5	80000	100000

Tabla 3-4 Criterio de porcentaje de vacíos

Porcentaje de vacíos			
Criterio	Clave	Rangos	
<10	1	0%	10%
10<20	2	10%	20%
20<30	3	20%	30%
30<40	4	30%	40%
40<60	5	40%	60%
60<80	6	60%	80%
>80	7	80%	100%

Tabla 3-5 Criterio de periodo de años

Periodo de Años			
Criterio	Clave	Rango	
>20	1	100	20
20>15	2	20	15
15>10	3	15	10
<10	4	10	0

Tabla 3-6 Criterio de selección de último año

Ultimo año			
Criterio	Clave	Rango	
2010-2015	1	2010	2019
2005-2010	2	2005	2010

2000-2005	3	2000	2005
1995-2000	4	1995	2000
1990-1995	5	1990	1995
1985-1990	6	1985	1990
<1985	7	0	1985

Tabla 3-7 Criterio de la situación de la estación

Situación	
Criterio	Clave
Operando	1
Suspendida	2

Aplicando los criterios de preselección se obtuvo lo siguiente

Tabla 3-8 Codificación de criterios de preselección

Código	Ubicación de estaciones		% Vacíos		Periodo de tiempo		Situación		Ultimo año registrado		Concatenado
	Ubicación	Clave	% Vacíos	Clave2	Años	Clave3	Situación	Clave4	Ultimo año	Clave5	
14278	6535.832464	1	60.77%	6	13	3	SUSPENDIDA	2	1978	7	1 6 3 2 7
14002	26857.49411	2	3.70%	1	54	1	OPERANDO	1	2014	1	2 1 1 1 1
14009	45872.71505	3	20.00%	2	91	1	SUSPENDIDA	2	2014	1	3 2 1 2 1
14010	46446.58015	3	9.59%	1	49	1	OPERANDO	1	1989	6	3 1 1 1 6
14012	21070.75447	2	40.00%	4	28	1	SUSPENDIDA	2	1988	6	2 4 1 2 6
14038	54265.74942	3	0.17%	1	60	1	SUSPENDIDA	2	2014	1	3 1 1 2 1
14040	55349.20591	3	1.63%	1	80	1	SUSPENDIDA	2	2014	1	3 1 1 2 1
14056	36259.87618	2	7.59%	1	54	1	SUSPENDIDA	2	2014	1	2 1 1 2 1
14082	23120.98628	2	4.00%	1	15	3	OPERANDO	1	1975	7	2 1 3 1 7
14065	20473.58256	2	0.00%	1	1	4	OPERANDO	1	2013	1	2 1 4 1 1
14377	34843.99781	2	0.00%	1	1	4	OPERANDO	1	1990	5	2 1 4 1 5
14088	34521.44472	2	8.75%	1	8	4	OPERANDO	1	1974	7	2 1 4 1 7
14066	30546.19008	2	8.10%	1	84	1	OPERANDO	1	2014	1	2 1 1 1 1
14072	48435.86469	3	4.53%	1	64	1	SUSPENDIDA	2	2014	1	3 1 1 2 1
14073	41291.59992	3	8.52%	1	61	1	SUSPENDIDA	2	2005	2	3 1 1 2 2

14077	42605.10092	3	16.33%	2	60	1	OPERANDO	1	2007	2	3 2 1 1 2
14089	32983.37316	2	3.33%	1	60	1	SUSPENDIDA	2	2014	1	2 1 1 2 1
14093	51624.05705	3	4.56%	1	68	1	SUSPENDIDA	2	2014	1	3 1 1 2 1
14055	13420.94186	2	15.38%	2	13	3	SUSPENDIDA	2	1971	7	2 2 3 2 7
14292	20473.58256	2	15.00%	2	10	4	OPERANDO	1	1983	7	2 2 4 1 7
14113	26857.49411	2	13.97%	2	68	1	OPERANDO	1	2014	1	2 2 1 1 1
14115	30546.19008	2	19.35%	2	31	1	OPERANDO	1	1999	4	2 2 1 1 4
14338	21070.75447	2	21.67%	3	18	2	OPERANDO	1	1998	4	2 3 2 1 4
14121	20473.58256	2	9.29%	1	42	1	OPERANDO	1	1998	4	2 1 1 1 4
14130	42269.23994	3	2.41%	1	29	1	OPERANDO	1	1990	5	3 1 1 1 5
14188	23120.98628	2	34.50%	4	20	2	OPERANDO	1	1989	6	2 4 2 1 6
14287	22716.42178	2	35.63%	4	16	2	SUSPENDIDA	2	1977	7	2 4 2 2 7
14380	15813.03047	2	40.00%	4	2	4	OPERANDO	1	2003	3	2 4 4 1 3
14356	33144.61532	2	38.57%	4	7	4	OPERANDO	1	1989	6	2 4 4 1 6
14373	34590.03133	2	42.00%	5	15	3	SUSPENDIDA	2	2000	3	2 5 3 2 3
14132	30245.36084	2	10.28%	2	72	1	OPERANDO	1	2014	1	2 2 1 1 1
14281	32983.37316	2	62.22%	6	9	4	OPERANDO	1	1975	7	2 6 4 1 7
14295	20473.58256	2	66.00%	6	5	4	SUSPENDIDA	2	1978	7	2 6 4 2 7
14136	30869.3249	2	6.27%	1	59	1	OPERANDO	1	2014	1	2 1 1 1 1
14162	30869.3249	2	15.12%	2	41	1	SUSPENDIDA	2	1999	4	2 2 1 2 4
14163	29308.21826	2	20.00%	2	28	1	SUSPENDIDA	2	1988	6	2 2 1 2 6
14168	48979.97422	3	17.86%	2	70	1	SUSPENDIDA	2	2014	1	3 2 1 2 1
14169	20473.58256	2	11.78%	2	73	1	SUSPENDIDA	2	2014	1	2 2 1 2 1
14396	42605.10092	3	6.96%	1	23	1	OPERANDO	1	2014	1	3 1 1 1 1
14187	36150.77518	2	28.33%	3	54	1	SUSPENDIDA	2	2014	1	2 3 1 2 1
14195	46446.58015	3	18.97%	2	29	1	SUSPENDIDA	2	2014	1	3 2 1 2 1
14279	20473.58256	2	66.30%	6	27	1	SUSPENDIDA	2	1977	7	2 6 1 2 7
14064	43939.73081	3	4.62%	1	39	1	OPERANDO	1	1986	6	3 1 1 1 6
14294	25040.09373	2	32.63%	4	38	1	OPERANDO	1	2011	1	2 4 1 1 1
14329	30546.19008	2	3.33%	1	36	1	OPERANDO	1	2014	1	2 1 1 1 1
14351	12702.09707	2	30.00%	3	47	1	OPERANDO	1	2014	1	2 3 1 1 1
14386	40574.94441	3	19.58%	2	24	1	SUSPENDIDA	2	2014	1	3 2 1 2 1
14388	50943.13639	3	2.80%	1	25	1	SUSPENDIDA	2	2011	1	3 1 1 2 1
14314	56232.7058	3	17.39%	2	23	1	SUSPENDIDA	2	2009	2	3 2 1 2 2

14057	43285.39473	3	11.40%	2	43	1	OPERANDO	1	1991	5	3 2 1 1 5
14333	43526.74372	3	21.00%	3	10	4	SUSPENDIDA	2	1990	5	3 3 4 2 5
14173	57412.39345	3	31.86%	4	43	1	SUSPENDIDA	2	1980	7	3 4 1 2 7
14362	40168.44619	3	38.75%	4	8	4	OPERANDO	1	1991	5	3 4 4 1 5
14269	43526.74372	3	57.76%	5	76	1	OPERANDO	1	2014	1	3 5 1 1 1
14063	56232.7058	3	58.48%	5	66	1	SUSPENDIDA	2	2014	1	3 5 1 2 1
14171	50943.13639	3	55.73%	5	75	1	SUSPENDIDA	2	2014	1	3 5 1 2 1
14277	56232.7058	3	62.50%	6	8	4	SUSPENDIDA	2	1974	7	3 6 4 2 7
14018	71673.87561	4	3.52%	1	71	1	SUSPENDIDA	2	2014	1	4 1 1 2 1
14029	77148.72313	4	4.00%	1	45	1	SUSPENDIDA	2	2014	1	4 1 1 2 1
14039	67425.317	4	5.49%	1	71	1	OPERANDO	1	2014	1	4 1 1 1 1
14068	73610.66233	4	7.33%	1	75	1	SUSPENDIDA	2	2014	1	4 1 1 2 1
14104	61330.68615	4	9.09%	1	66	1	OPERANDO	1	2011	1	4 1 1 1 1
14143	65242.63503	4	9.72%	1	72	1	OPERANDO	1	2014	1	4 1 1 1 1
14156	63451.73865	4	2.35%	1	68	1	OPERANDO	1	2014	1	4 1 1 1 1
14379	71992.53112	4	7.88%	1	33	1	SUSPENDIDA	2	2014	1	4 1 1 2 1
14397	61464.53185	4	5.65%	1	23	1	SUSPENDIDA	2	2014	1	4 1 1 2 1
14013	61182.26611	4	2.88%	1	59	1	SUSPENDIDA	2	2004	3	4 1 1 2 3
14110	75109.03473	4	5.14%	1	35	1	SUSPENDIDA	2	1999	4	4 1 1 2 4
14008	71112.00425	4	6.33%	1	30	1	SUSPENDIDA	2	1992	5	4 1 1 2 5
14105	66451.12428	4	8.21%	1	28	1	SUSPENDIDA	2	1990	5	4 1 1 2 5
14185	72562.37069	4	2.67%	1	30	1	SUSPENDIDA	2	1990	5	4 1 1 2 5
14146	63116.20776	4	13.65%	2	52	1	OPERANDO	1	2014	1	4 2 1 1 1
14189	78402.6255	4	14.20%	2	50	1	SUSPENDIDA	2	2014	1	4 2 1 2 1
14391	78650.55731	4	10.40%	2	25	1	SUSPENDIDA	2	2014	1	4 2 1 2 1
14111	76481.87479	4	15.95%	2	74	1	SUSPENDIDA	2	2014	1	4 2 1 2 1
14001	73629.58124	4	16.67%	2	12	3	OPERANDO	1	1973	7	4 2 3 1 7
14149	70551.90173	4	11.25%	2	8	4	SUSPENDIDA	2	1972	7	4 2 4 2 7
14041	68356.29411	4	21.67%	3	24	1	SUSPENDIDA	2	1989	6	4 3 1 2 6
14307	73629.58124	4	30.00%	3	15	3	OPERANDO	1	1995	4	4 3 3 1 4
14183	66210.31607	4	46.19%	5	42	1	SUSPENDIDA	2	1989	6	4 5 1 2 6
14276	75109.03473	4	53.48%	5	46	1	OPERANDO	1	1977	7	4 5 1 1 7
14323	60045.47863	4	84.41%	7	34	1	SUSPENDIDA	2	2014	1	4 7 1 2 1
14087	82223.46832	5	2.64%	1	53	1	OPERANDO	1	2014	1	5 1 1 1 1

14337	90967.5833	5	7.94%	1	34	1	SUSPENDIDA	2	2014	1	5 1 1 2 1
14154	83527.76902	5	4.48%	1	58	1	SUSPENDIDA	2	2000	3	5 1 1 2 3
14301	80571.06839	5	4.64%	1	28	1	OPERANDO	1	2003	3	5 1 1 1 3
14107	81613.76472	5	3.42%	1	38	1	SUSPENDIDA	2	1987	6	5 1 1 2 6
14184	85131.20338	5	0.00%	1	29	1	SUSPENDIDA	2	1989	6	5 1 1 2 6
14078	80457.23472	5	11.21%	2	66	1	OPERANDO	1	2014	1	5 2 1 1 1
14086	81771.27215	5	15.63%	2	64	1	SUSPENDIDA	2	2014	1	5 2 1 2 1
14014	83492.75908	5	12.89%	2	45	1	OPERANDO	1	1991	5	5 2 1 1 5
14147	83787.34604	5	13.83%	2	47	1	OPERANDO	1	1989	6	5 2 1 1 6
14316	84878.02408	5	26.92%	3	13	3	OPERANDO	1	1987	6	5 3 3 1 6
14368	82666.51058	5	67.58%	6	33	1	OPERANDO	1	2014	1	5 6 1 1 1
14102	86328.99217	5	76.92%	6	39	1	OPERANDO	1	2003	3	5 6 1 1 3

Al aplicarse estos criterios se hizo un primer filtro de las estaciones, ya que se trabajara con un periodo de al menos 25 años, por lo que de las 95 estaciones se redujeron a solo 47

*Tabla 3-9 pre selección de las estaciones finales*

Código	Ubicación de estaciones		% Vacíos		Periodo de tiempo		Situación		Ultimo año registrado		Concatenado
	Ubicación	Clave	% Vacíos	Clave2	Años	Clave3	Situación	Clave4	Ultimo año	Clave5	Ub, %V, A, S, Ua
14002	26857.49411	2	3.70%	1	54	1	OPERANDO	1	2014	1	2 1 1 1 1
14009	45872.71505	3	20.00%	2	91	1	SUSPENDIDA	2	2014	1	3 2 1 2 1
14010	46446.58015	3	9.59%	1	49	1	OPERANDO	1	1989	6	3 1 1 1 6
14012	21070.75447	2	40.00%	4	28	1	SUSPENDIDA	2	1988	6	2 4 1 2 6
14038	54265.74942	3	0.17%	1	60	1	SUSPENDIDA	2	2014	1	3 1 1 2 1
14040	55349.20591	3	1.63%	1	80	1	SUSPENDIDA	2	2014	1	3 1 1 2 1
14056	36259.87618	2	7.59%	1	54	1	SUSPENDIDA	2	2014	1	2 1 1 2 1
14066	30546.19008	2	8.10%	1	84	1	OPERANDO	1	2014	1	2 1 1 1 1
14072	48435.86469	3	4.53%	1	64	1	SUSPENDIDA	2	2014	1	3 1 1 2 1
14073	41291.59992	3	8.52%	1	61	1	SUSPENDIDA	2	2005	2	3 1 1 2 2
14077	42605.10092	3	16.33%	2	60	1	OPERANDO	1	2007	2	3 2 1 1 2
14089	32983.37316	2	3.33%	1	60	1	SUSPENDIDA	2	2014	1	2 1 1 2 1
14093	51624.05705	3	4.56%	1	68	1	SUSPENDIDA	2	2014	1	3 1 1 2 1
14113	26857.49411	2	13.97%	2	68	1	OPERANDO	1	2014	1	2 2 1 1 1

14115	30546.19008	2	19.35%	2	31	1	OPERANDO	1	1999	4	2 2 1 1 4
14121	20473.58256	2	9.29%	1	42	1	OPERANDO	1	1998	4	2 1 1 1 4
14130	42269.23994	3	2.41%	1	29	1	OPERANDO	1	1990	5	3 1 1 1 5
14132	30245.36084	2	10.28%	2	72	1	OPERANDO	1	2014	1	2 2 1 1 1
14136	30869.3249	2	6.27%	1	59	1	OPERANDO	1	2014	1	2 1 1 1 1
14162	30869.3249	2	15.12%	2	41	1	SUSPENDIDA	2	1999	4	2 2 1 2 4
14163	29308.21826	2	20.00%	2	28	1	SUSPENDIDA	2	1988	6	2 2 1 2 6
14168	48979.97422	3	17.86%	2	70	1	SUSPENDIDA	2	2014	1	3 2 1 2 1
14169	20473.58256	2	11.78%	2	73	1	SUSPENDIDA	2	2014	1	2 2 1 2 1
14187	36150.77518	2	28.33%	3	54	1	SUSPENDIDA	2	2014	1	2 3 1 2 1
14195	46446.58015	3	18.97%	2	29	1	SUSPENDIDA	2	2014	1	3 2 1 2 1
14279	20473.58256	2	66.30%	6	27	1	SUSPENDIDA	2	1977	7	2 6 1 2 7
14294	25040.09373	2	32.63%	4	38	1	OPERANDO	1	2011	1	2 4 1 1 1
14329	30546.19008	2	3.33%	1	36	1	OPERANDO	1	2014	1	2 1 1 1 1
14351	12702.09707	2	30.00%	3	47	1	OPERANDO	1	2014	1	2 3 1 1 1
14388	50943.13639	3	2.80%	1	25	1	SUSPENDIDA	2	2011	1	3 1 1 2 1

### 3.3 SELECCIÓN DE ESTACIONES Y LLENADO DE DATOS

De las estaciones seleccionadas y de algunas que no cumplían con el número de años pero tenían buenas características en otros criterios, se les aplicaron las pruebas de homogeneidad, tendencia e independencia, para llegar a las estaciones principales para el estudio.

*Tabla 3-10 Pruebas de homogeneidad, tendencia e independencia*

Estación	T-Student	Cramer	Bartlett	P. de regresión	Spearman	Mann Kendall	L. Anderson	Wald-wolfowitz
14001	Homogénea	Homogénea	Homogénea	Sin tendencia	Sin tendencia	sin tendencia	Independiente	Independiente
14002	Homogénea	Homogénea	Homogénea	Sin tendencia	Sin tendencia	sin tendencia	Independiente	Independiente
14008	Homogénea	Homogénea	Homogénea	Sin tendencia	Sin tendencia	sin tendencia	Independiente	Independiente
14009	Homogénea	Homogénea	Homogénea	Sin tendencia	Sin tendencia	sin tendencia	Independiente	Independiente
14010	Homogénea	Homogénea	Homogénea	Sin tendencia	Sin tendencia	sin tendencia	Independiente	Independiente

14012	Homogénea	Homogénea	No Homogénea	Sin tendencia	Sin tendencia	sin tendencia	Independiente	Independiente
14014	Homogénea	Homogénea	Homogénea	Sin tendencia	Sin tendencia	sin tendencia	Independiente	Independiente
14018	Homogénea	Homogénea	Homogénea	Sin tendencia	Sin tendencia	sin tendencia	Independiente	Independiente
14029	Homogénea	Homogénea	Homogénea	Sin tendencia	Sin tendencia	sin tendencia	Dep. a 1 años	Independiente
14038	Homogénea	Homogénea	Homogénea	Sin tendencia	Sin tendencia	sin tendencia	Independiente	Independiente
14039	Homogénea	Homogénea	Homogénea	Sin tendencia	Sin tendencia	sin tendencia	Independiente	Independiente
14040	Homogénea	Homogénea	Homogénea	Sin tendencia	Sin tendencia	sin tendencia	Independiente	Independiente
14041	Homogénea	Homogénea	Homogénea	Sin tendencia	Sin tendencia	sin tendencia	Independiente	Independiente
14055	Homogénea	Homogénea	Homogénea	Sin tendencia	Sin tendencia	sin tendencia	Independiente	Independiente
14056	Homogénea	Homogénea	Homogénea	Sin tendencia	Sin tendencia	sin tendencia	Independiente	Independiente
14057	Homogénea	Homogénea	No Homogénea	Existe Tendencia	Sin tendencia	sin tendencia	Independiente	Independiente
14063	Homogénea	Homogénea	Homogénea	Sin tendencia	Sin tendencia	sin tendencia	Independiente	Independiente
14064	Homogénea	Homogénea	Homogénea	Sin tendencia	Sin tendencia	sin tendencia	Independiente	Independiente
14066	Homogénea	Homogénea	Homogénea	Sin tendencia	Sin tendencia	sin tendencia	Independiente	Independiente
14072	Homogénea	Homogénea	Homogénea	Sin tendencia	Sin tendencia	sin tendencia	Independiente	Independiente
14073	Homogénea	Homogénea	Homogénea	Sin tendencia	Sin tendencia	sin tendencia	Independiente	Independiente
14078	Homogénea	Homogénea	Homogénea	Sin tendencia	Sin tendencia	sin tendencia	Independiente	Independiente
14082	Homogénea	Homogénea	Homogénea	Sin tendencia	Sin tendencia	sin tendencia	Independiente	Independiente
14086	Homogénea	Homogénea	Homogénea	Sin tendencia	Sin tendencia	sin tendencia	Independiente	Independiente
14087	Homogénea	Homogénea	Homogénea	Sin tendencia	Sin tendencia	sin tendencia	Independiente	Independiente
14089	Homogénea	Homogénea	Homogénea	Sin tendencia	Sin tendencia	sin tendencia	Independiente	Independiente
14105	Homogénea	Homogénea	Homogénea	Sin tendencia	Sin tendencia	sin tendencia	Independiente	Independiente
14107	Homogénea	Homogénea	Homogénea	Sin tendencia	Sin tendencia	sin tendencia	Independiente	Independiente
14110	Homogénea	Homogénea	Homogénea	Existe Tendencia	Sin tendencia	sin tendencia	Independiente	Independiente
14111	Homogénea	Homogénea	Homogénea	Sin tendencia	Sin tendencia	sin tendencia	Independiente	Independiente
14115	Homogénea	Homogénea	Homogénea	Sin tendencia	Sin tendencia	sin tendencia	Independiente	Independiente
14121	Homogénea	Homogénea	Homogénea	Sin tendencia	Sin tendencia	sin tendencia	Independiente	Independiente
14130	Homogénea	Homogénea	Homogénea	Sin tendencia	Sin tendencia	sin tendencia	Independiente	Independiente
14132	Homogénea	Homogénea	Homogénea	Sin tendencia	Sin tendencia	sin tendencia	Independiente	Independiente
14136	Homogénea	Homogénea	Homogénea	Sin tendencia	Sin tendencia	sin tendencia	Independiente	Independiente
14143	Homogénea	Homogénea	Homogénea	Sin tendencia	Sin tendencia	sin tendencia	Independiente	Independiente
14147	No Homogénea	Homogénea	Homogénea	Sin tendencia	Sin tendencia	sin tendencia	Independiente	Independiente
14154	Homogénea	Homogénea	Homogénea	Sin tendencia	Sin tendencia	sin tendencia	Independiente	Independiente
14156	Homogénea	Homogénea	Homogénea	Sin tendencia	Sin tendencia	sin tendencia	Independiente	Independiente

14162	Homogénea	Homogénea	Homogénea	Sin tendencia	Sin tendencia	sin tendencia	Independiente	Independiente
14163	Homogénea	Homogénea	No Homogénea	Sin tendencia	Sin tendencia	sin tendencia	Independiente	Independiente
14171	Homogénea	Homogénea	Homogénea	Sin tendencia	Sin tendencia	sin tendencia	Independiente	Independiente
14173	Homogénea	Homogénea	Homogénea	Sin tendencia	Sin tendencia	sin tendencia	Sin datos	Independiente
14183	Homogénea	Homogénea	Homogénea	Sin tendencia	Sin tendencia	sin tendencia	Sin datos	Independiente
14184	No Homogénea	Homogénea	Homogénea	Sin tendencia	Sin tendencia	sin tendencia	Independiente	Independiente
14185	Homogénea	Homogénea	Homogénea	Sin tendencia	Sin tendencia	sin tendencia	Independiente	Independiente
14189	Homogénea	Homogénea	Homogénea	Sin tendencia	Sin tendencia	sin tendencia	Independiente	Independiente
14195	Homogénea	Homogénea	Homogénea	Sin tendencia	Sin tendencia	sin tendencia	Independiente	Independiente
14276	Homogénea	Homogénea	Homogénea	Sin tendencia	Sin tendencia	sin tendencia	Independiente	Independiente
14294	Homogénea	Homogénea	Homogénea	Sin tendencia	Sin tendencia	sin tendencia	Independiente	Independiente
14301	Homogénea	Homogénea	Homogénea	Sin tendencia	Sin tendencia	sin tendencia	Independiente	Independiente
14307	Homogénea	Homogénea	Homogénea	Sin tendencia	Sin tendencia	sin tendencia	Sin datos	Independiente
14314	Homogénea	No Homogénea	Homogénea	Sin tendencia	Sin tendencia	sin tendencia	Dep. a 1 años	Independiente
14337	Homogénea	No Homogénea	Homogénea	Sin tendencia	Sin tendencia	sin tendencia	Independiente	Independiente
14338	Homogénea	Homogénea	Homogénea	Sin tendencia	Sin tendencia	sin tendencia	Sin datos	Independiente
14351	Homogénea	Homogénea	Homogénea	Sin tendencia	Sin tendencia	sin tendencia	Dep. a 1 años	Independiente
14379	Homogénea	Homogénea	Homogénea	Sin tendencia	Sin tendencia	sin tendencia	Independiente	Independiente
14388	Homogénea	Homogénea	Homogénea	Sin tendencia	Sin tendencia	sin tendencia	Independiente	Independiente
14391	Homogénea	Homogénea	Homogénea	Sin tendencia	Sin tendencia	sin tendencia	Independiente	Independiente
14396	Homogénea	Homogénea	Homogénea	Sin tendencia	Sin tendencia	sin tendencia	Independiente	Independiente
14397	Homogénea	Homogénea	Homogénea	Sin tendencia	Sin tendencia	sin tendencia	Independiente	Independiente

Después de obtener los resultados de las pruebas se hizo la selección de las estaciones que cumplieron con los parámetros, así como con los criterios de evaluación, para trabajar con ellas y a las cuales se les realizaría el llenado de datos faltantes.

Tabla 3-11 Estaciones seleccionadas

Estación	T-Student	Cramer	Bartlett	P. de regresión	Spearman	Mann Kendall	L. Anderson	Wald-wolfowitz
14002	Homogénea	Homogénea	Homogénea	Sin tendencia	Sin tendencia	sin tendencia	Independiente	Independiente
14009	Homogénea	Homogénea	Homogénea	Sin tendencia	Sin tendencia	sin tendencia	Independiente	Independiente
14038	Homogénea	Homogénea	Homogénea	Sin tendencia	Sin tendencia	sin tendencia	Independiente	Independiente

14039	Homogénea	Homogénea	Homogénea	Sin tendencia	Sin tendencia	sin tendencia	Independiente	Independiente
14040	Homogénea	Homogénea	Homogénea	Sin tendencia	Sin tendencia	sin tendencia	Independiente	Independiente
14056	Homogénea	Homogénea	Homogénea	Sin tendencia	Sin tendencia	sin tendencia	Independiente	Independiente
14063	Homogénea	Homogénea	Homogénea	Sin tendencia	Sin tendencia	sin tendencia	Independiente	Independiente
14066	Homogénea	Homogénea	Homogénea	Sin tendencia	Sin tendencia	sin tendencia	Independiente	Independiente
14072	Homogénea	Homogénea	Homogénea	Sin tendencia	Sin tendencia	sin tendencia	Independiente	Independiente
14078	Homogénea	Homogénea	Homogénea	Sin tendencia	Sin tendencia	sin tendencia	Independiente	Independiente
14086	Homogénea	Homogénea	Homogénea	Sin tendencia	Sin tendencia	sin tendencia	Independiente	Independiente
14087	Homogénea	Homogénea	Homogénea	Sin tendencia	Sin tendencia	sin tendencia	Independiente	Independiente
14089	Homogénea	Homogénea	Homogénea	Sin tendencia	Sin tendencia	sin tendencia	Independiente	Independiente
14111	Homogénea	Homogénea	Homogénea	Sin tendencia	Sin tendencia	sin tendencia	Independiente	Independiente
14132	Homogénea	Homogénea	Homogénea	Sin tendencia	Sin tendencia	sin tendencia	Independiente	Independiente
14136	Homogénea	Homogénea	Homogénea	Sin tendencia	Sin tendencia	sin tendencia	Independiente	Independiente
14156	Homogénea	Homogénea	Homogénea	Sin tendencia	Sin tendencia	sin tendencia	Independiente	Independiente
14171	Homogénea	Homogénea	Homogénea	Sin tendencia	Sin tendencia	sin tendencia	Independiente	Independiente
14189	Homogénea	Homogénea	Homogénea	Sin tendencia	Sin tendencia	sin tendencia	Independiente	Independiente

El llenado de datos faltantes se realizó mediante el programa GESTAD que evalúa distintos parámetros para obtener el mejor resultado posible mediante regresión múltiple, regresión simple y por IDW arrojando el valor más preciso.



Figura 3.3 Programa Gestion de datos climatologicos

### 3.4 SERIES DE CAMBIO CLIMÁTICO

A través de la plataforma del Instituto Nacional de Ecología y Cambio Climático (INECC), se obtiene la información de cambio climático tanto para precipitación como para temperatura para los RCP de 4.5 y 8.5 para periodos de corto (2015-2039), mediano (2045-2069) y largo plazo (2075-2099) utilizando la metodología de los países de:

- Francia
- Estados Unidos
- Reino Unido
- Alemania

En las Tablas 3-12, 3-13, 3-14, 3-15 se muestran los modelos utilizados, así como el lugar de su procedencia y con la información que se contaba por parte del INECC.

Tabla 3-12 Datos de modelación de cambio climático de Francia

MCG	INSTITUCIÓN	PAIS	RCP	PERIODO	VARIABLE CLIMÁTICA	VALOR
CNRMC-M5	Centre National de Recherches Meteorologiques	Francia	RCP 4.5	2015-2039	Precipitación (mm)	Dato
					Temperatura media (°C)	Dato
				2045-2069	Precipitación (mm)	Dato
					Temperatura media (°C)	Dato
				2075-2099	Precipitación (mm)	Dato
					Temperatura media (°C)	Dato
			RCP 8.5	2015-2039	Precipitación (mm)	Dato
					Temperatura media (°C)	Dato
				2045-2069	Precipitación (mm)	No Dato
					Temperatura media (°C)	Dato
				2075-2099	Precipitación (mm)	Dato
					Temperatura media (°C)	Dato

Tabla 3-13 Datos de modelación de cambio climático de Estados Unidos

MCG	INSTITUCIÓN	PAIS	RCP	PERIODO	VARIABLE CLIMÁTICA	VALOR
GFDL-CM3	Geophysical Fluid Dynamics Laboratory	Estados Unidos	RCP 4.5	2015-2039	Precipitación (mm)	Dato
					Temperatura media (°C)	Dato
				2045-2069	Precipitación (mm)	Dato
					Temperatura media (°C)	Dato
				2075-2099	Precipitación (mm)	Dato
					Temperatura media (°C)	Dato
			RCP 8.5	2015-2039	Precipitación (mm)	Dato
					Temperatura media (°C)	Dato
				2045-2069	Precipitación (mm)	No Dato
					Temperatura media (°C)	Dato
				2075-2099	Precipitación (mm)	Dato
					Temperatura media (°C)	Dato

Tabla 3-14 Datos de modelación de cambio climático de Reino Unido

MCG	INSTITUCIÓN	PAIS	RCP	PERIODO	VARIABLE CLIMÁTICA	VALOR
HADGEM2-ES	Met Office Hadley Center	Reino Unido	RCP 4.5	2015-2039	Precipitación (mm)	Dato
					Temperatura media (°C)	Dato
				2045-2069	Precipitación (mm)	Dato
					Temperatura media (°C)	Dato
				2075-2099	Precipitación (mm)	Dato
					Temperatura media (°C)	Dato
			RCP 8.5	2015-2039	Precipitación (mm)	Dato
					Temperatura media (°C)	Dato
				2045-2069	Precipitación (mm)	No Dato
					Temperatura media (°C)	Dato
				2075-2099	Precipitación (mm)	Dato
					Temperatura media (°C)	Dato

Tabla 3-15 Datos de modelación de cambio climático de Alemania

MCG	INSTITUCIÓN	PAIS	RCP	PERIODO	VARIABLE CLIMÁTICA	VALOR
MPI-ESM-LR	Max Plank Institute for Meteorology	Alemania	RCP 4.5	2015-2039	Precipitación (mm)	Dato
					Temperatura media (°C)	No Dato
				2045-2069	Precipitación (mm)	Dato
					Temperatura media (°C)	Dato
				2075-2099	Precipitación (mm)	Dato
					Temperatura media (°C)	Dato
			RCP 8.5	2015-2039	Precipitación (mm)	Dato
					Temperatura media (°C)	Dato
				2045-2069	Precipitación (mm)	No Dato
					Temperatura media (°C)	Dato
				2075-2099	Precipitación (mm)	Dato
					Temperatura media (°C)	Dato

Se realiza con estos países debido a que México no tiene su propio modelo, por lo que se procede a la descarga de los cuatro modelos aplicados por el INECC para posteriormente realizar un promedio y generar valores para México.

Para este proceso se tuvieron que analizar un total de 7740 pixeles de información de los cuatro modelos, para poder generar un promedio entre los cuatro y aplicarlo en México

Se tomó esta decisión de realizar un promedio de los cuatro modelos debido a que en los modelos la mayoría tiene valores similares y solo en algunos pixeles de información varían un poco, por lo que se vio conveniente obtener un valor mediante la evaluación de los cuatro.

Esta información se obtuvo de los mapas de precipitación Figura 3.4 y de temperatura Figura 3.5 con el sistema operativo de ArcMap. Para posteriormente ser aplicados a los datos históricos de precipitación y temperatura.

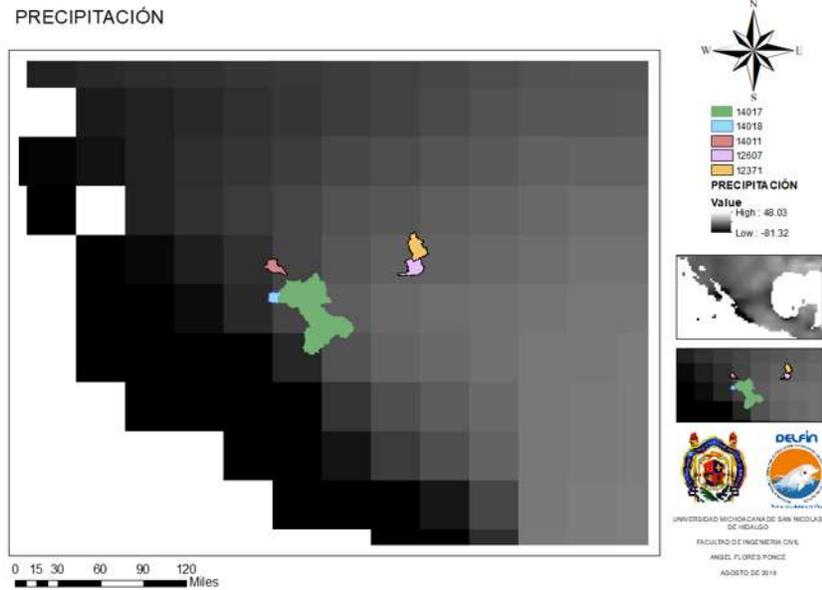


Figura 3.4 Mapa de precipitación para cambio climático

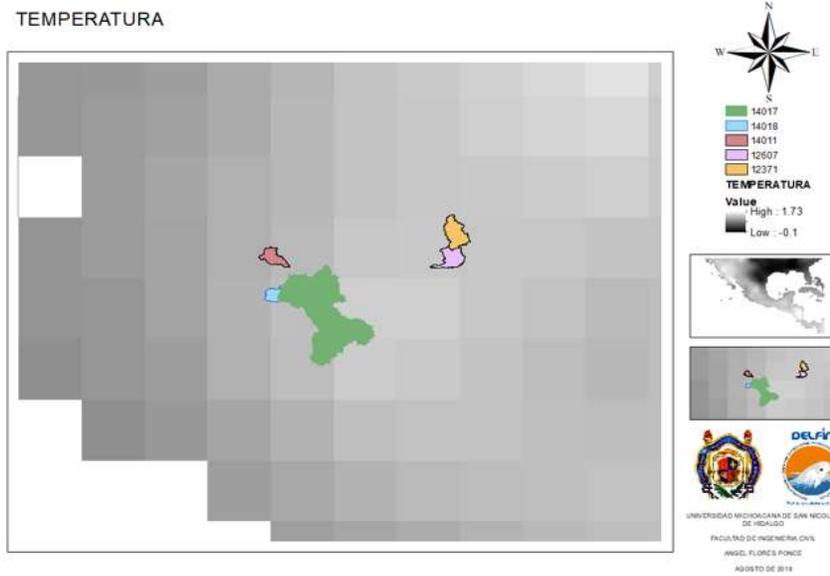


Figura 3.5 Mapa de temperatura para cambio climático

Una vez realizada la obtención de los datos del cambio climático, fueron aplicados a los datos históricos para la obtención de sus posibilidades de cambio a diferentes periodos y se obtuvieron los siguientes valores para la zona de estudio.

Tabla 3-16 Cambio Climático en la zona de estudio

PAIS	RCP	PERIODO	VARIABLE CLIMÁTICA	CAMBIO CLIMÁTICO											
				ENERO	FEBRERO	MARZO	ABRIL	MAYO	JUNIO	JULIO	AGOSTO	SEPTIEMBRE	OCTUBRE	NOVIEMBRE	DICIEMBRE
MÉXICO	RCP 4.5	2015-2039	Precipitación (mm)	14.82	3.80	0.98	5.89	33.54	163.79	217.52	190.01	118.68	45.68	17.79	0.00
			Temperatura media (°C)	15.22	16.03	18.52	21.01	22.67	22.22	20.49	20.09	20.08	19.01	17.46	16.02
		2045-2069	Precipitación (mm)	11.43	1.69	0.00	4.05	21.29	155.61	214.21	175.54	135.00	55.51	22.44	2.82
			Temperatura media (°C)	16.21	17.17	19.54	22.02	23.87	23.46	21.56	21.31	21.10	19.87	18.23	16.92
		2075-2099	Precipitación (mm)	6.82	0.00	0.00	4.16	21.60	159.96	215.58	182.56	134.46	57.35	17.40	0.00
			Temperatura media (°C)	16.61	17.70	20.10	22.58	24.31	23.81	22.02	21.63	21.48	20.25	18.68	17.29
	RCP 8.5	2015-2039	Precipitación (mm)	13.58	0.00	0.67	7.11	28.72	151.20	217.52	188.78	131.89	56.32	15.79	0.00
			Temperatura media (°C)	15.40	16.26	18.55	21.04	22.64	22.36	20.73	20.43	20.23	19.01	17.42	16.03
		2045-2069	Precipitación (mm)												
			Temperatura media (°C)	16.88	17.90	20.32	22.81	24.49	24.14	22.39	22.04	21.80	20.58	19.16	17.77
		2075-2099	Precipitación (mm)	0.00	0.00	0.00	0.00	10.82	153.35	207.42	163.95	143.89	61.77	28.16	0.00
			Temperatura media (°C)	18.75	19.77	22.29	24.85	26.55	26.06	24.39	24.04	23.69	22.40	20.91	19.62

Con los diferentes RCP y los diferentes periodos, se hace una comparativa grafica con respecto de los valores históricos, para poder apreciar los cambios climáticos posibles para la región.

Estos posibles cambios se muestran en las figuras 3.6, 3.7, 3.8 y 3.9

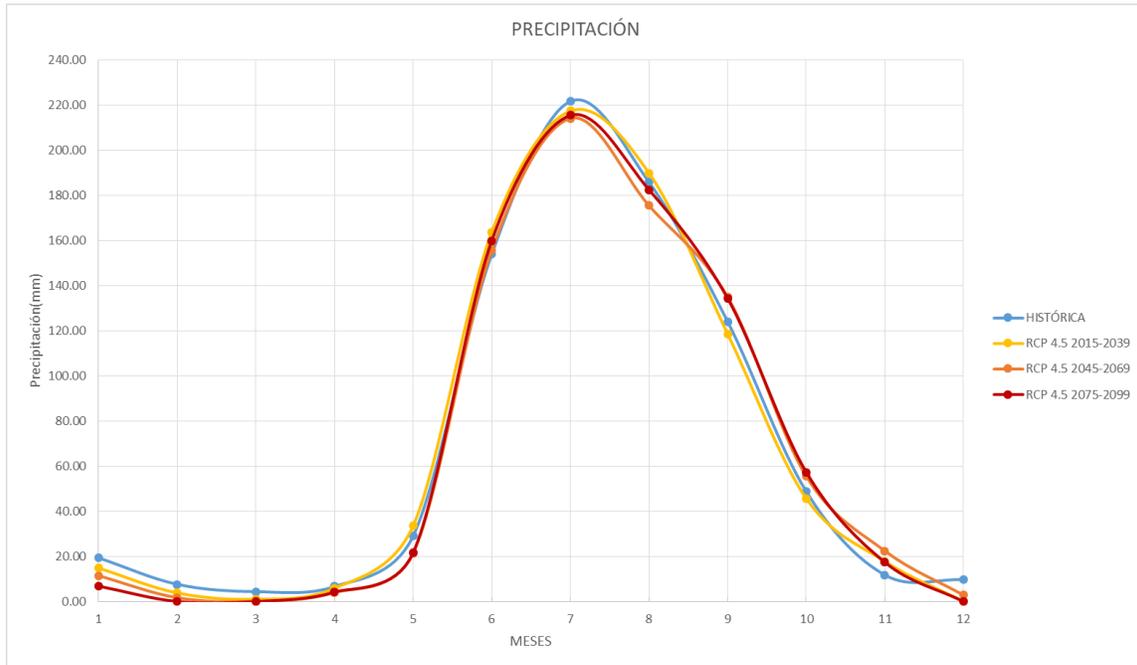


Figura 3.6 Comparación de la precipitación a un RCP 4.5 a diferentes periodos

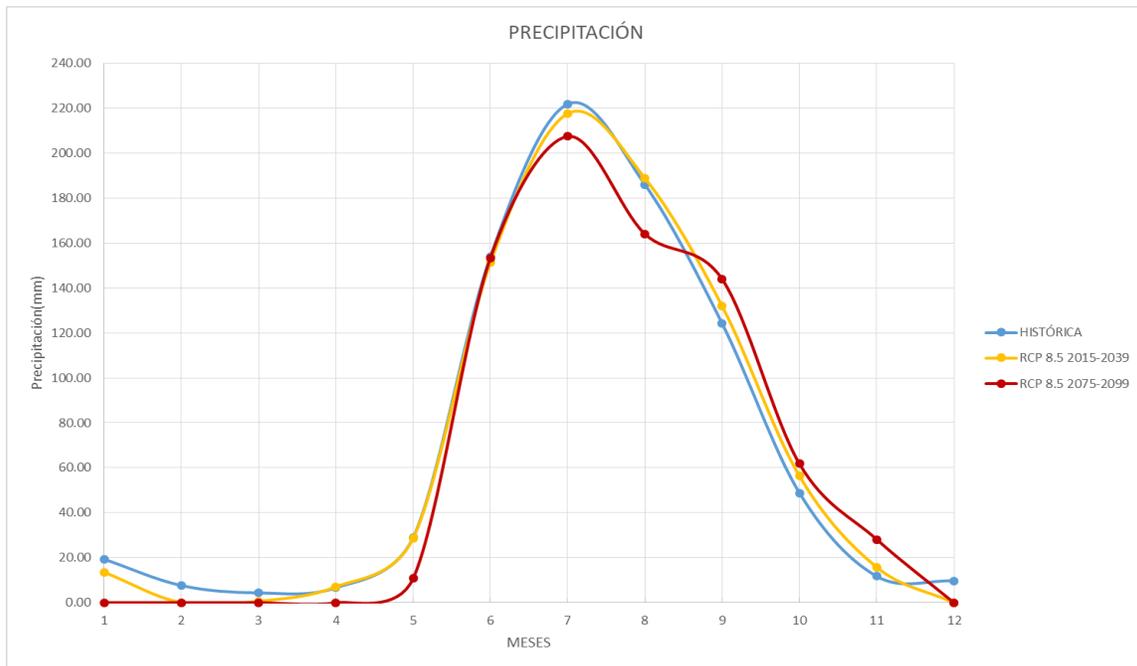


Figura 3.7 Comparación de la precipitación a un RCP 8.5 a diferentes periodos

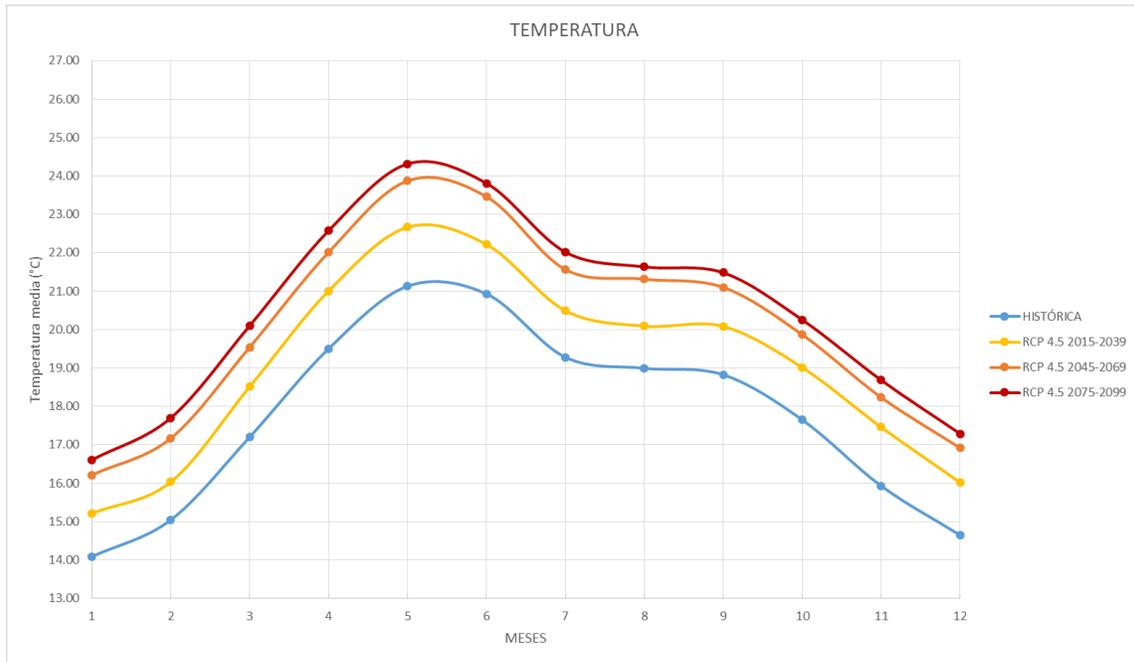


Figura 3.8 Comparación de la temperatura a un RCP 4.5 a diferentes periodos

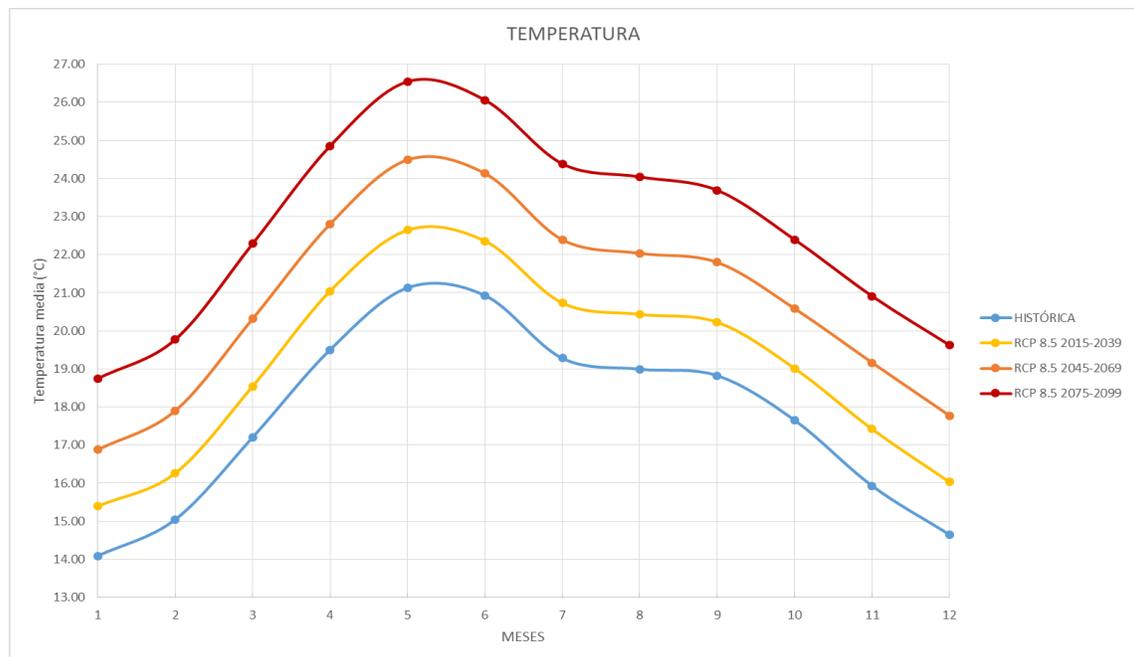


Figura 3.9 Comparación de la temperatura a un RCP 8.5 a diferentes periodos

Con estos valores de cambio climático se procede a trasladarse a cada una de las estaciones meteorológicas para aplicar el cambio climático y ver cómo se comportan cada una; para hacer esta afectación se hizo mediante porcentajes para afectar a cada estación con la afectación que tendrá el cambio climático en ellas.

La afectación del cambio climático en las precipitaciones para los distintos periodos con un RCP de 4.5 se muestra en la Tabla 3-17

Tabla 3-17 Precipitación futura con RCP de 4.5 a Periodos 2015-2039, 2045-2069 y 2075-2099

	enero	febrero	marzo	abril	mayo	junio	julio	agosto	septiembre	octubre	noviembre	diciembre
4.5 2015-2039	-90%	-100%	-100%	-60%	7%	6%	-2%	2%	-3%	-4%	16%	-100%
	-100%	-100%	-100%	-65%	116%	14%	-2%	2%	-4%	-6%	71%	-38%
	-60%	-25%	-63%	-21%	12%	5%	-2%	2%	-4%	-3%	280%	-100%
	-44%	-86%	-100%	-100%	1628%	6%	-1%	3%	-5%	-9%	85%	-97%
	-2%	-99%	-100%	-12%	11%	11%	-2%	2%	-4%	-3%	35%	-69%
	-31%	-100%	-100%	-14%	86%	5%	-2%	3%	-4%	-8%	363%	-100%
	-100%	-60%	-100%	-19%	40%	5%	-3%	2%	-3%	-7%	61%	-100%
	-28%	-77%	-100%	-100%	19%	6%	-3%	2%	-4%	-20%	83%	-76%
	-100%	-66%	-100%	-98%	18%	5%	-2%	2%	-3%	-5%	81%	-100%
	-77%	-100%	-9%	-1%	15%	6%	-2%	3%	-5%	-3%	20%	-100%
	-100%	-100%	-100%	-100%	236%	9%	-2%	2%	-2%	-7%	119%	-100%
	-100%	-79%	-100%	-100%	32%	6%	-2%	2%	-6%	-10%	142%	-100%
	-100%	-100%	-100%	-100%	12%	5%	-3%	3%	-5%	-5%	78%	-93%
	-100%	-100%	-51%	-47%	13%	5%	-2%	2%	-6%	-8%	124%	-100%
	-28%	-20%	-100%	-100%	15%	7%	-1%	3%	-3%	-5%	12%	-100%
	-52%	-100%	-100%	-74%	20%	4%	-2%	3%	-3%	-5%	82%	-100%
	-12%	-54%	-54%	-78%	8%	4%	-3%	2%	-2%	-14%	2388%	-100%
	-59%	-17%	-100%	-100%	105%	13%	-2%	3%	-5%	-6%	2470%	-100%
	-100%	-100%	-100%	-22%	27%	6%	-2%	2%	-4%	-3%	50%	-80%
	-21%	-23%	-100%	-19%	146%	5%	-2%	2%	-3%	-8%	50%	-100%
-100%	-100%	-100%	-9%	60%	4%	-2%	2%	-3%	-8%	425%	-100%	
-76%	-100%	-100%	-100%	10%	7%	-2%	2%	-3%	-6%	216%	-100%	
-14%	-3%	-100%	-100%	43%	6%	-1%	2%	-4%	-100%	129%	-100%	
-100%	-100%	-100%	-12%	48%	8%	-2%	3%	-7%	-4%	465%	-100%	
-100%	-5%	-100%	-100%	61%	6%	-2%	2%	-7%	-15%	86%	-100%	

4.5 2045-2069	-100%	-100%	-100%	-100%	-100%	2%	-4%	-5%	8%	14%	125%	-20%
	-100%	-38%	-100%	-69%	-21%	1%	-3%	-5%	8%	5%	495%	-100%
	-77%	-100%	-100%	-100%	-100%	1%	-2%	-7%	10%	19%	150%	-50%
	-4%	-100%	-100%	-40%	-18%	2%	-3%	-5%	9%	6%	62%	-35%
	-54%	-100%	-100%	-47%	-100%	1%	-3%	-7%	8%	18%	643%	-100%
	-100%	-93%	-100%	-64%	-68%	1%	-5%	-5%	7%	14%	108%	-100%
	-50%	-100%	-100%	-100%	-33%	1%	-4%	-4%	8%	43%	146%	-39%
	-100%	-100%	-100%	-100%	-30%	1%	-4%	-6%	6%	10%	143%	-100%
	-100%	-100%	-21%	-5%	-25%	1%	-3%	-8%	10%	7%	35%	-100%
	-100%	-100%	-100%	-100%	-100%	1%	-4%	-5%	4%	15%	210%	-100%
	-100%	-100%	-100%	-100%	-55%	1%	-3%	-5%	12%	22%	250%	-100%
	-100%	-100%	-100%	-100%	-21%	1%	-5%	-7%	9%	11%	139%	-48%
	-100%	-100%	-100%	-100%	-22%	1%	-3%	-5%	12%	18%	220%	-100%
	-49%	-32%	-100%	-100%	-25%	1%	-3%	-7%	7%	10%	21%	-100%
	-92%	-100%	-100%	-100%	-35%	1%	-3%	-7%	6%	11%	145%	-100%
	-20%	-83%	-100%	-100%	-13%	1%	-5%	-5%	5%	31%	4224%	-71%
	-100%	-26%	-100%	-100%	-100%	2%	-3%	-6%	10%	13%	4367%	-100%
	-100%	-100%	-100%	-74%	-46%	1%	-4%	-4%	7%	7%	89%	-41%
	-38%	-36%	-100%	-63%	-100%	1%	-4%	-6%	7%	17%	88%	-96%
	-100%	-100%	-100%	-29%	-100%	1%	-3%	-6%	6%	17%	752%	-100%
-100%	-100%	-100%	-100%	-17%	1%	-4%	-6%	6%	13%	382%	-86%	
-24%	-5%	-100%	-100%	-73%	1%	-2%	-6%	7%	561%	229%	-100%	
-100%	-100%	-100%	-40%	-81%	1%	-3%	-7%	14%	8%	822%	-100%	
-100%	-7%	-100%	-100%	-100%	1%	-3%	-6%	14%	32%	153%	-55%	
-17%	-100%	-100%	-100%	-27%	1%	-3%	-6%	5%	14%	19%	-8%	
4.5 2075-2099	-100%	-100%	-100%	-100%	-100%	9%	-3%	-2%	8%	18%	66%	-34%
	-100%	-87%	-100%	-66%	-20%	3%	-3%	-2%	7%	7%	262%	-100%
	-100%	-100%	-100%	-100%	-100%	3%	-2%	-2%	9%	24%	79%	-85%
	-6%	-100%	-100%	-38%	-17%	7%	-2%	-2%	8%	8%	33%	-61%
	-85%	-100%	-100%	-46%	-100%	3%	-3%	-2%	7%	23%	340%	-100%
	-100%	-100%	-100%	-61%	-65%	3%	-4%	-2%	6%	18%	57%	-100%
	-78%	-100%	-100%	-100%	-31%	4%	-4%	-1%	8%	55%	77%	-67%
	-100%	-100%	-100%	-100%	-29%	3%	-3%	-2%	6%	13%	76%	-100%
	-100%	-100%	-27%	-5%	-24%	3%	-3%	-3%	9%	9%	19%	-100%
	-100%	-100%	-100%	-100%	-100%	5%	-3%	-2%	4%	19%	111%	-100%

-100%	-100%	-100%	-100%	-53%	3%	-3%	-2%	11%	28%	132%	-100%
-100%	-100%	-100%	-100%	-20%	3%	-4%	-2%	9%	14%	73%	-82%
-100%	-100%	-100%	-100%	-21%	3%	-3%	-2%	11%	23%	116%	-100%
-78%	-73%	-100%	-100%	-24%	4%	-2%	-2%	6%	13%	11%	-100%
-100%	-100%	-100%	-100%	-33%	3%	-3%	-2%	5%	14%	77%	-100%
-32%	-100%	-100%	-100%	-13%	2%	-4%	-2%	4%	39%	2232%	-100%
-100%	-60%	-100%	-100%	-100%	8%	-2%	-2%	10%	17%	2308%	-100%
-100%	-100%	-100%	-71%	-44%	4%	-3%	-1%	7%	9%	47%	-71%
-59%	-82%	-100%	-60%	-100%	3%	-3%	-2%	6%	22%	46%	-100%
-100%	-100%	-100%	-28%	-98%	2%	-2%	-2%	6%	21%	398%	-100%
-100%	-100%	-100%	-100%	-17%	4%	-4%	-2%	6%	16%	202%	-100%
-37%	-12%	-100%	-100%	-70%	4%	-2%	-2%	7%	715%	121%	-100%
-100%	-100%	-100%	-38%	-78%	5%	-3%	-2%	13%	10%	435%	-100%
-100%	-16%	-100%	-100%	-99%	4%	-3%	-2%	13%	41%	81%	-95%
-27%	-100%	-100%	-100%	-26%	5%	-3%	-2%	5%	18%	10%	-15%

La afectación del cambio climático en las precipitaciones para los distintos periodos con un RCP de 8.5 se muestra en la Tabla 3-18

Tabla 3-18 Precipitación futura con RCP de 4.5 a Periodos 2015-2039 y 2075-2099

	enero	febrero	marzo	abril	mayo	junio	julio	agosto	septiembre	octubre	noviembre	diciembre
8.5 2015-2039	-100%	-100%	-100%	34%	0%	-2%	-2%	2%	5%	11%	11%	-100%
	-100%	-100%	-100%	37%	-7%	-4%	-2%	1%	6%	16%	47%	-31%
	-77%	-85%	-68%	12%	-1%	-1%	-2%	1%	6%	6%	187%	-100%
	-56%	-100%	-100%	-100%	-99%	-2%	-1%	2%	7%	21%	57%	-77%
	-3%	-100%	-100%	7%	-1%	-3%	-2%	1%	6%	7%	23%	-55%
	-39%	-100%	-100%	8%	-5%	-1%	-2%	2%	6%	20%	243%	-100%
	-100%	-100%	-100%	11%	-2%	-1%	-3%	1%	5%	16%	41%	-100%
	-36%	-100%	-100%	83%	-1%	-2%	-2%	1%	6%	48%	55%	-61%
	-100%	-100%	-100%	55%	-1%	-1%	-2%	2%	4%	12%	54%	-100%
	-98%	-100%	-10%	1%	-1%	-2%	-2%	2%	7%	8%	13%	-100%
	-100%	-100%	-100%	-100%	-14%	-2%	-2%	1%	3%	17%	79%	-100%
	-100%	-100%	-100%	643%	-2%	-2%	-2%	1%	9%	25%	95%	-100%
	-100%	-100%	-100%	-100%	-1%	-2%	-3%	2%	6%	12%	52%	-74%
-100%	-100%	-56%	26%	-1%	-1%	-2%	1%	8%	20%	83%	-100%	

	-36%	-70%	-100%	155%	-1%	-2%	-1%	2%	5%	11%	8%	-100%
	-67%	-100%	-100%	42%	-1%	-1%	-2%	2%	4%	12%	55%	-100%
	-15%	-100%	-59%	44%	0%	-1%	-3%	1%	3%	35%	1595%	-100%
	-75%	-58%	-100%	66%	-6%	-4%	-2%	2%	7%	15%	1649%	-100%
	-100%	-100%	-100%	12%	-2%	-2%	-2%	1%	5%	8%	34%	-64%
	-27%	-80%	-100%	11%	-9%	-1%	-2%	2%	5%	19%	33%	-100%
	-100%	-100%	-100%	5%	-4%	-1%	-2%	2%	4%	19%	284%	-100%
	-97%	-100%	-100%	135%	-1%	-2%	-2%	2%	4%	14%	144%	-100%
	-17%	-11%	-100%	142%	-3%	-2%	-1%	2%	5%	629%	86%	-100%
	-100%	-100%	-100%	7%	-3%	-2%	-2%	2%	10%	9%	311%	100%
	-100%	-15%	-100%	503%	-4%	-2%	-2%	2%	10%	36%	58%	-86%
	-100%	-100%	-100%	-100%	-100%	-1%	-8%	-11%	15%	27%	192%	-60%
	-100%	-100%	-100%	-100%	-50%	0%	-6%	-10%	14%	10%	760%	-100%
	-100%	-100%	-100%	-100%	-100%	0%	-4%	-15%	18%	36%	230%	-100%
	-10%	-100%	-100%	-100%	-42%	-1%	-6%	-10%	16%	11%	95%	-100%
	-100%	-100%	-100%	-100%	-100%	0%	-6%	-16%	14%	35%	987%	-100%
	-100%	-100%	-100%	-100%	-100%	0%	-10%	-11%	12%	28%	166%	-100%
	-100%	-100%	-100%	-100%	-77%	0%	-8%	-9%	15%	83%	224%	-100%
	-100%	-100%	-100%	-100%	-71%	0%	-8%	-12%	11%	20%	220%	-100%
	-100%	-100%	-38%	-16%	-58%	0%	-7%	-17%	18%	13%	54%	-100%
	-100%	-100%	-100%	-100%	-100%	-1%	-7%	-11%	7%	29%	323%	-100%
	-100%	-100%	-100%	-100%	-100%	0%	-7%	-10%	22%	43%	385%	-100%
	-100%	-100%	-100%	-100%	-49%	0%	-10%	-14%	17%	21%	213%	-100%
	-100%	-100%	-100%	-100%	-52%	0%	-6%	-11%	21%	35%	338%	-100%
	-100%	-100%	-100%	-100%	-59%	0%	-5%	-14%	12%	19%	32%	-100%
	-100%	-100%	-100%	-100%	-82%	0%	-6%	-15%	10%	22%	223%	-100%
	-100%	-100%	-100%	-100%	-31%	0%	-9%	-10%	8%	60%	6484%	-100%
	-100%	-85%	-100%	-100%	-100%	-1%	-5%	-14%	18%	26%	6704%	-100%
	-100%	-100%	-100%	-100%	-100%	0%	-8%	-9%	13%	14%	137%	-100%
	-100%	-100%	-100%	-100%	-100%	0%	-7%	-12%	12%	33%	135%	-100%
	-100%	-100%	-100%	-94%	-100%	0%	-5%	-13%	11%	33%	1155%	-100%
	-100%	-100%	-100%	-100%	-41%	0%	-8%	-13%	11%	25%	586%	-100%
	-64%	-16%	-100%	-100%	-100%	0%	-4%	-13%	13%	1085%	351%	-100%
	-100%	-100%	-100%	-100%	-100%	-1%	-6%	-14%	25%	15%	1262%	-100%
	-100%	-23%	-100%	-100%	-100%	0%	-6%	-12%	25%	63%	235%	-100%
	-47%	-100%	-100%	-100%	-63%	0%	-6%	-13%	9%	27%	29%	-26%

Con estas afectaciones porcentuales se trasladan a cada estación y se obtiene las nuevas series meteorológicas con cambio climático

### 3.5 APLICACIÓN DEL ÍNDICE ESTANDARIZADO DE PRECIPITACIÓN

Se aplica el SPI 12 ya que es el que considera todos los doce meses del año, esto se hace para cada una de las estaciones tanto para periodo histórico, como para periodo futuro en el cual se considera cada uno de los RCP y los distintos periodos de tiempo corto, medio y largo.

Para el criterio del SPI para sequía y humedad se consideran los siguientes rangos:

Tabla 3-19 Rangos del SPI para sequía y humedad

2	>=	SPI			Extremadamente húmedos
1.5	>=	SPI	<	2	Muy húmedo
1	>=	SPI	<	2	Moderadamente húmedo
-1	>=	SPI	<	1	Normal
-1.5	>	SPI	<=	-1	Moderadamente seco
-2	>	SPI	<=	-2	Muy seco
	>	SPI	<=	-2	Extremadamente seco

Con estos parámetros se tiene las sequías y humedades para cada mes de cada año de cada estación como el que se muestra a continuación

Tabla 3-20 Sequías y Humedades de la estación 14002

año	SPI											
	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12
2015												1.771
2016	1.638	1.646	1.646	1.660	0.737	-0.837	-0.855	-1.057	-1.433	-1.520	-1.637	-1.774
2017	-1.660	-1.667	-1.667	-1.679	-0.915	0.133	-0.878	-0.681	0.323	0.873	0.917	0.810
2018	-0.527	-0.535	-0.535	-0.539	-3.839	-3.642	-2.921	-2.917	-3.179	-3.587	-4.065	-4.264

2019	-3.184	-3.193	-3.193	-3.216	0.431	-0.810	-0.160	0.105	0.149	0.522	0.892	0.789
2020	0.866	0.870	0.870	0.878	0.834	1.974	2.008	1.567	1.193	1.291	0.574	0.464
2021	0.424	0.412	0.412	0.416	0.449	0.191	0.461	0.514	1.031	1.175	2.353	2.276
2022	2.108	2.135	2.135	2.152	1.886	1.249	0.931	1.193	0.501	-0.022	-0.061	-0.181
2023	-0.176	-0.179	-0.179	-0.196	-0.380	-0.065	-0.376	-0.046	0.980	0.910	0.825	0.720
2024	0.662	0.668	0.668	0.692	1.135	1.966	1.925	1.403	0.254	0.809	1.369	1.275
2025	1.177	1.183	1.183	1.193	0.627	0.282	-0.279	-0.851	0.201	0.057	0.120	0.002
2026	-0.006	-0.005	-0.005	-0.005	0.303	-0.262	0.405	1.112	0.490	0.525	0.603	0.492
2027	0.450	0.452	0.452	0.457	0.440	0.453	0.259	-0.415	0.161	0.148	0.258	0.144
2028	0.126	0.127	0.127	0.129	-0.076	0.918	-0.301	0.844	0.316	0.175	-0.418	-0.547
2029	-0.537	-0.538	-0.538	-0.542	-0.225	-2.131	-0.239	-0.211	-0.352	-0.393	0.157	0.039
2030	-0.097	-0.097	-0.097	-0.104	-0.315	1.705	0.813	0.042	-0.541	-0.496	-0.396	-0.524
2031	-0.411	-0.488	-0.488	-0.484	-0.168	1.118	-0.635	-0.114	1.098	1.190	1.394	1.301
2032	1.269	1.362	1.362	1.373	1.290	0.376	1.409	0.086	-0.167	-0.327	-2.484	-2.656
2033	-2.476	-2.482	-2.482	-2.566	-2.467	-2.904	-2.429	-1.320	-1.178	-1.185	1.199	1.105
2034	1.019	1.024	1.024	1.130	0.886	0.834	0.263	0.206	-0.187	-0.345	-0.331	-0.459
2035	-0.434	-0.436	-0.436	-0.438	-0.597	-0.145	0.171	-0.136	0.209	0.070	0.007	-0.113
2036	-0.194	-0.194	-0.194	-0.195	0.194	0.032	-0.733	-0.912	-1.012	-0.609	-0.520	-0.651
2037	-0.535	-0.537	-0.537	-0.540	-0.519	-0.167	0.276	0.740	1.476	1.524	1.770	1.684
2038	1.558	1.565	1.565	1.578	1.219	1.320	0.517	0.218	0.103	-0.163	-0.261	-0.387
2039	-0.368	-0.369	-0.369	-0.371	-0.312	-0.412	0.741	0.565	-0.471	-0.379	-1.121	-1.121

Al igual que se tiene su grafico de comportamiento

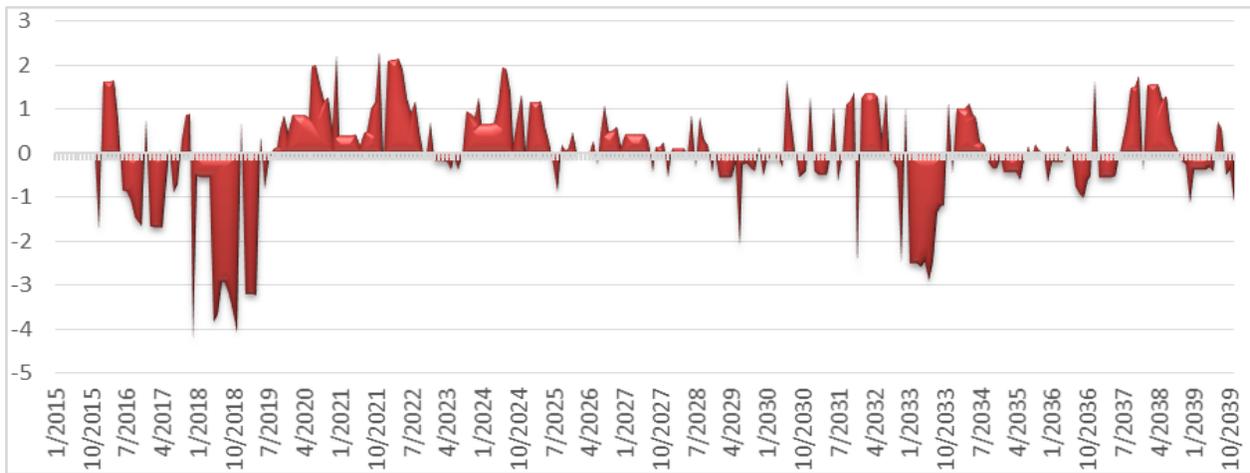


Figura 3.10 Sequias y Humedades de la estación 14002

### 3.6 AÑOS SECOS Y AÑOS HÚMEDOS

Mediante la metodología de Martínez Alfaro propuesta en su libro fundamentos de hidrogeología se obtiene las secuencias de años secos y años húmedos de las principales estaciones así como de una estación en el centro del bosque, esto con la finalidad de ver qué resultados de sequía y de humedad se pueden esperar en el estudio.

Estas secuencias se muestran en las siguientes figuras



Figura 3.11 Secuencia húmeda, secuencia media y secuencia seca de la estación 14002



Figura 3.12 Secuencia húmeda, secuencia media y secuencia seca de la estación 14056

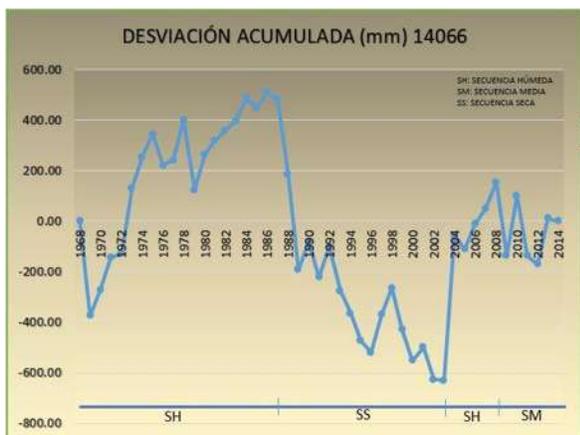


Figura 3.14 Secuencia húmeda, secuencia media y secuencia seca de la estación 14066



Figura 3.13 Secuencia húmeda, secuencia media y secuencia seca de la estación 14089



Figura 3.16 Secuencia húmeda, secuencia media y secuencia seca de la estación 14132

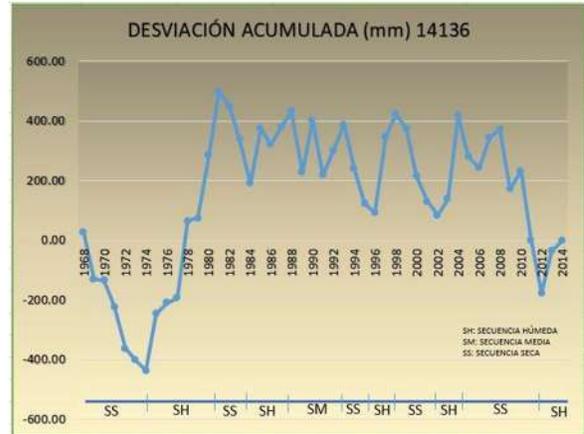


Figura 3.15 Secuencia húmeda, secuencia media y secuencia seca de la estación 14136



Figura 3.17 Secuencia húmeda, secuencia media y secuencia seca de la estación FIC

Con respecto a estas secuencias de años secos y húmedos de las distintas estaciones se obtuvieron los siguientes años secos y años húmedos

Tabla 3-21 Años secos y Años húmedos

	14002	14056	14066	14089	14132	14136	FIC
1975	851.50	798.72	1087.60	903.00	978.00	1081.40	872.31
1976	951.82	981.60	869.10	928.90	913.30	927.90	945.43
1977	859.10	1060.70	1018.20	1022.90	1076.70	905.70	1025.75
1987	864.52	998.43	965.60	1026.60	802.00	950.80	1005.80
1988	749.70	820.20	702.80	856.30	686.70	943.40	832.77
1989	621.30	645.80	614.80	738.50	674.40	685.80	696.79
1999	721.00	685.40	829.90	783.90	946.90	842.19	749.49
2000	730.20	751.54	874.10	749.60	869.70	731.92	753.58
2001	764.80	987.02	1045.90	923.00	902.00	805.22	939.38
2013	1026.50	1110.70	1177.10	1054.30	977.60	1031.45	1075.68
2014	926.50	1028.28	983.80	743.40	894.70	926.30	856.38

### 3.7 DISTRIBUCIÓN ESPACIAL DE LAS SEQUIAS

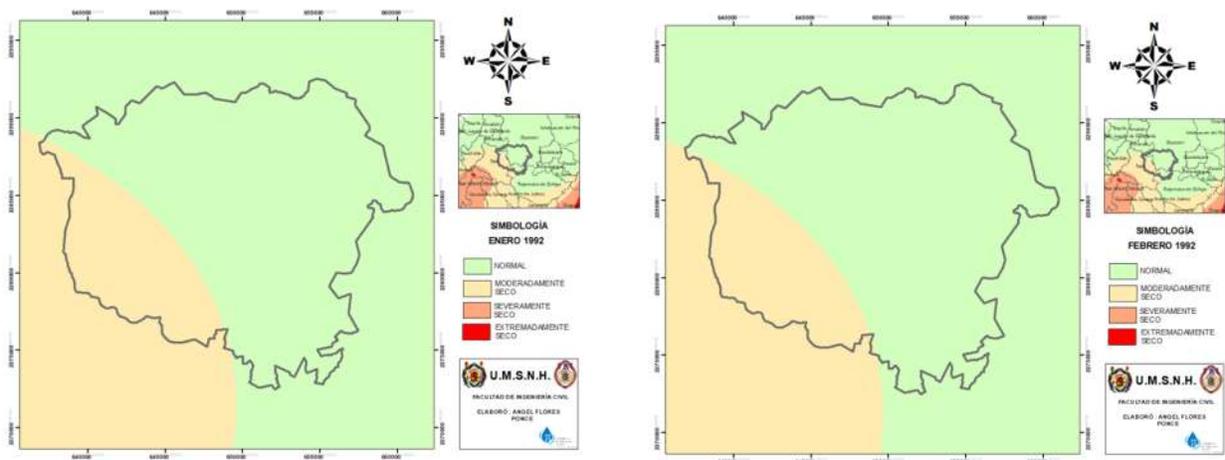
Ya obtenidos los SPI tanto históricos como futuros se procede a la realización de los mapas georreferenciados de la zona para la evaluación de las sequias y humedades presentadas en la zona

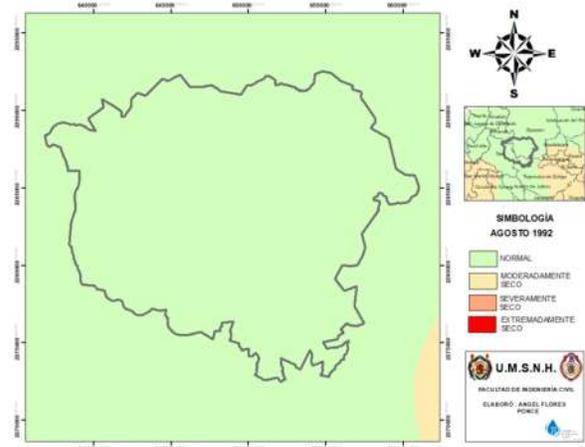
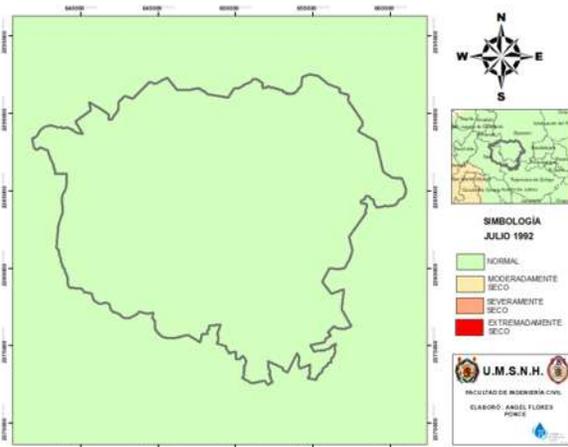
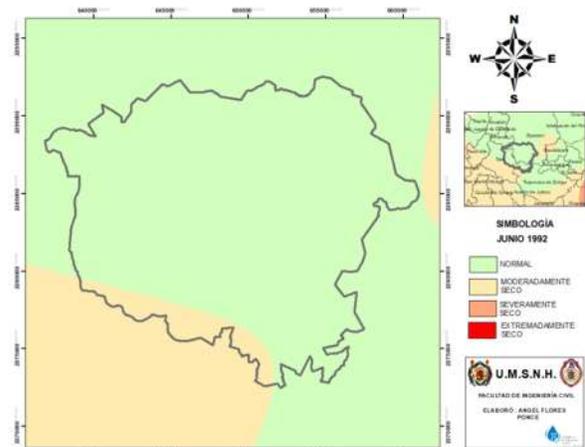
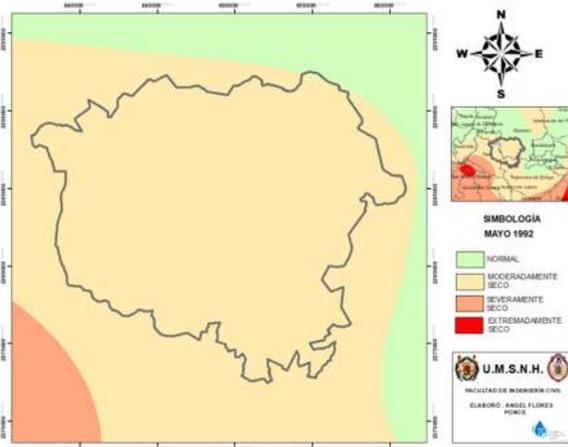
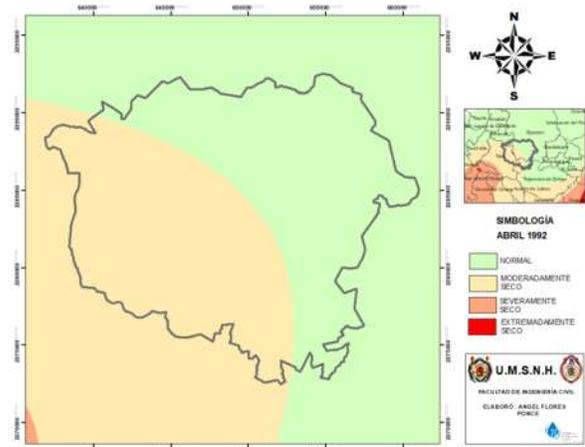
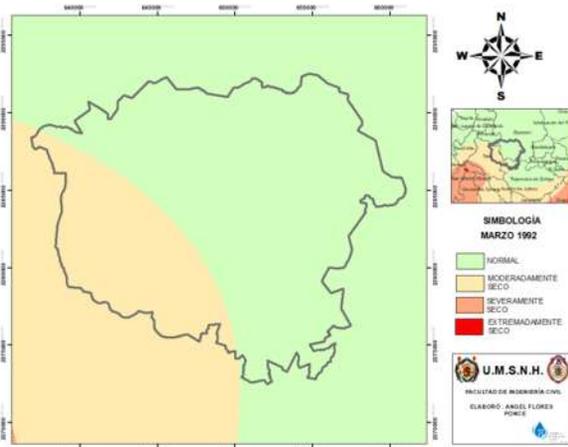
#### 3.7.1 SPI PERIODO HISTÓRICO

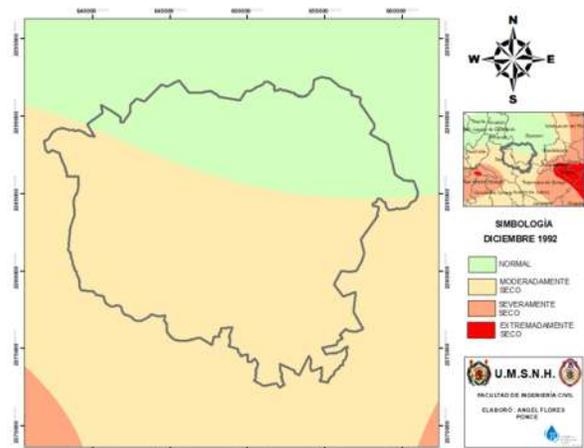
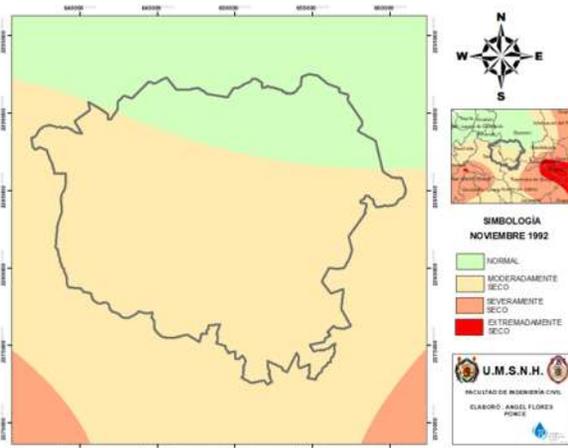
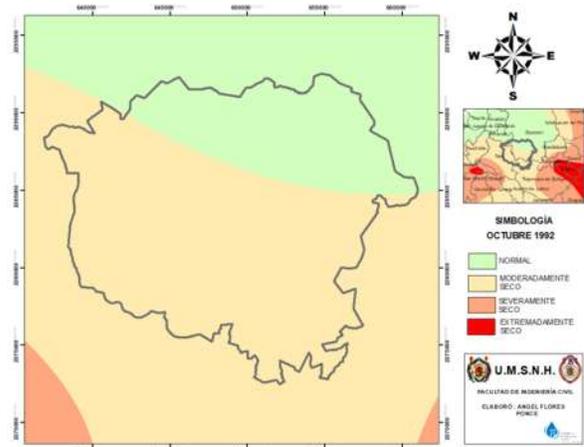
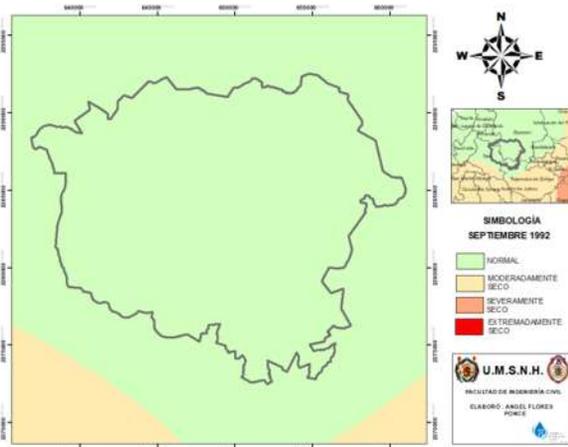
Para ese periodo se pudo apreciar que el año con mayor sequía fue el de 1992

Por lo que se decidió modelar cada mes de este año para ver el comportamiento de la sequía en el transcurso del año.

*Figura 3.18 Evolución espacial de la sequía en el bosque La Primavera año 1992*



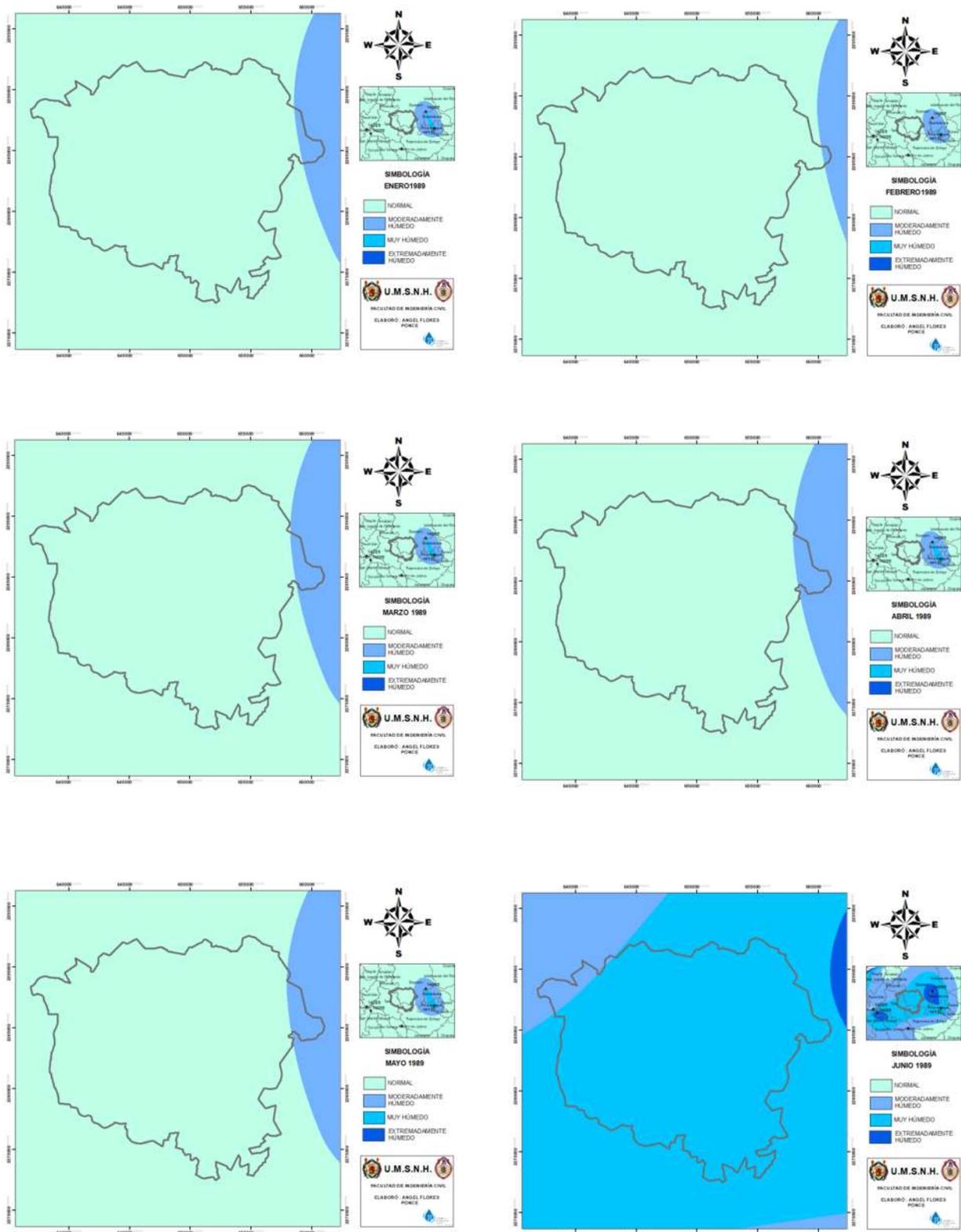


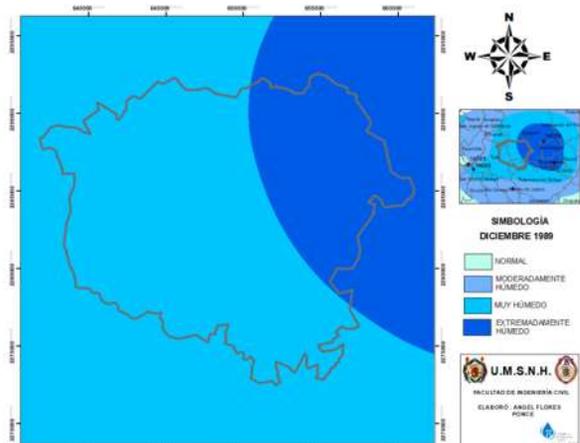
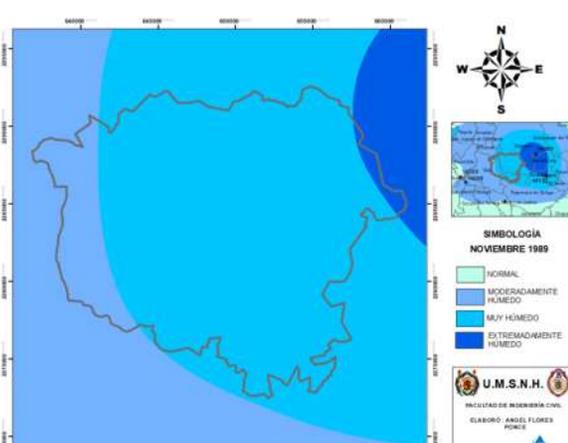
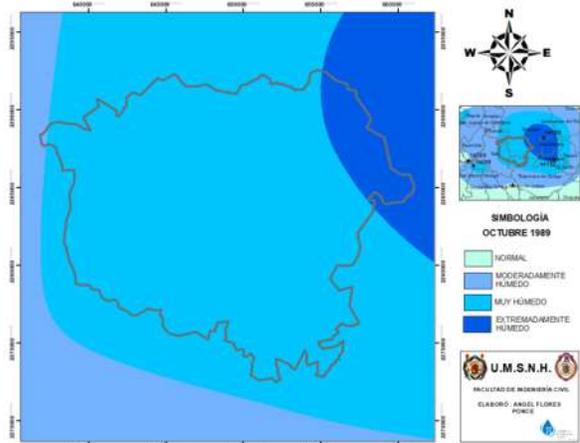
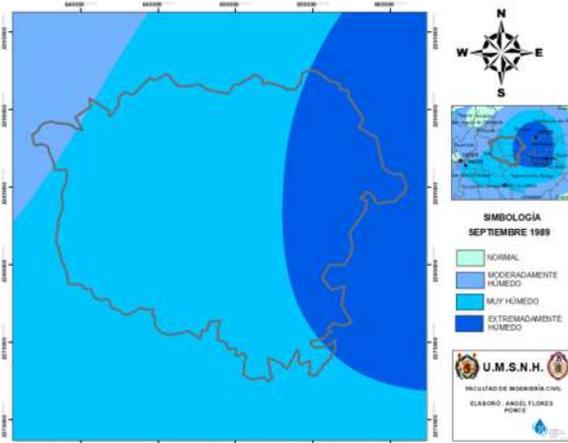
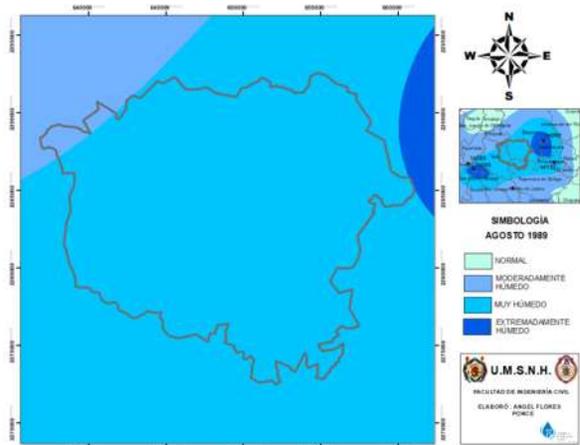
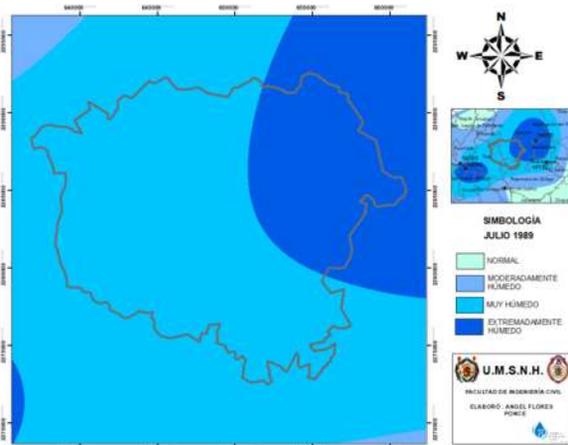


Para ese periodo se pudo apreciar que el año con mayor humedad fue el de 1989

Por lo que se decidió modelar cada mes de este año para ver el comportamiento de la humedad en el transcurso del año.

Figura 3.19 Evolución espacial de la humedad en el bosque La Primavera año 1989



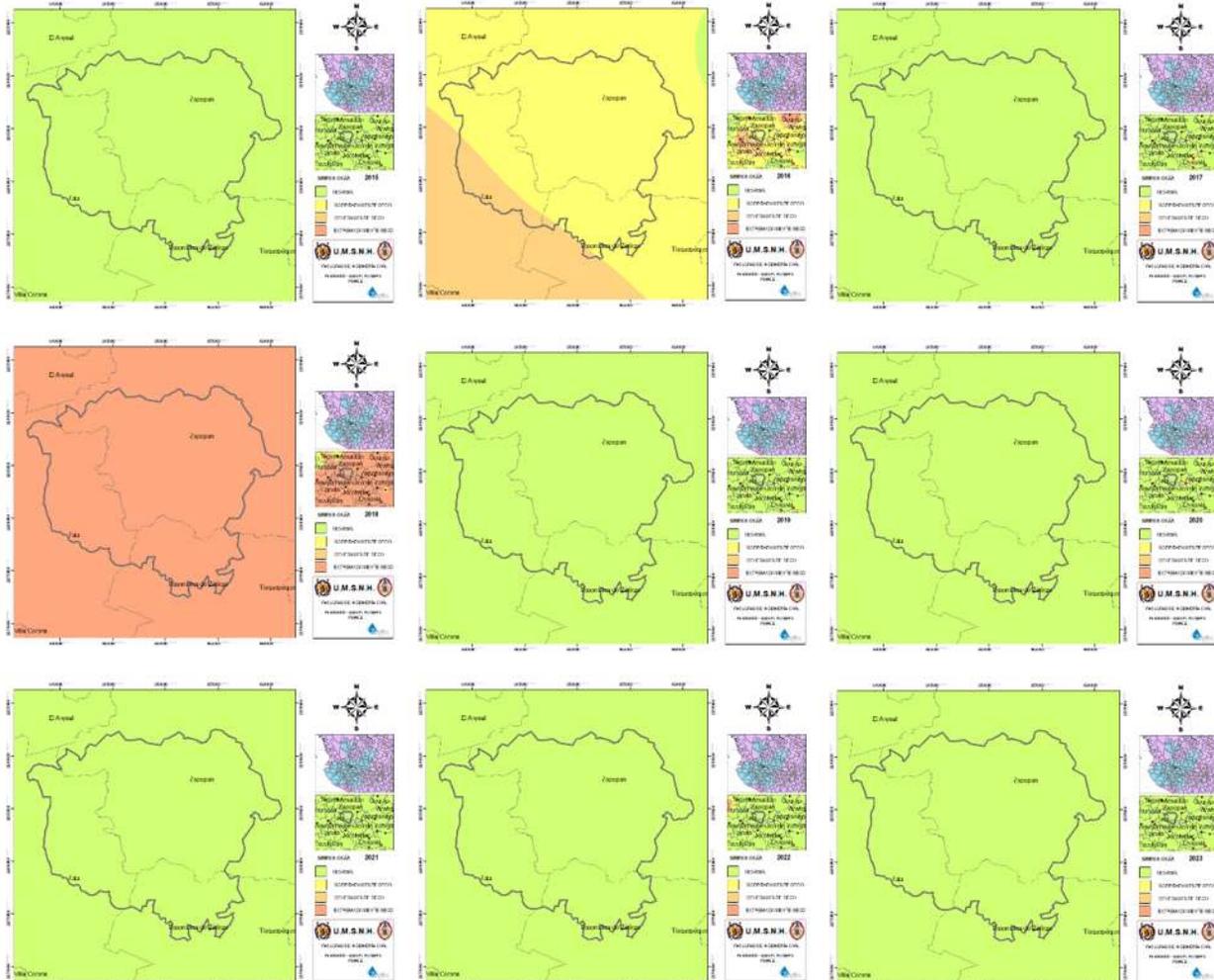


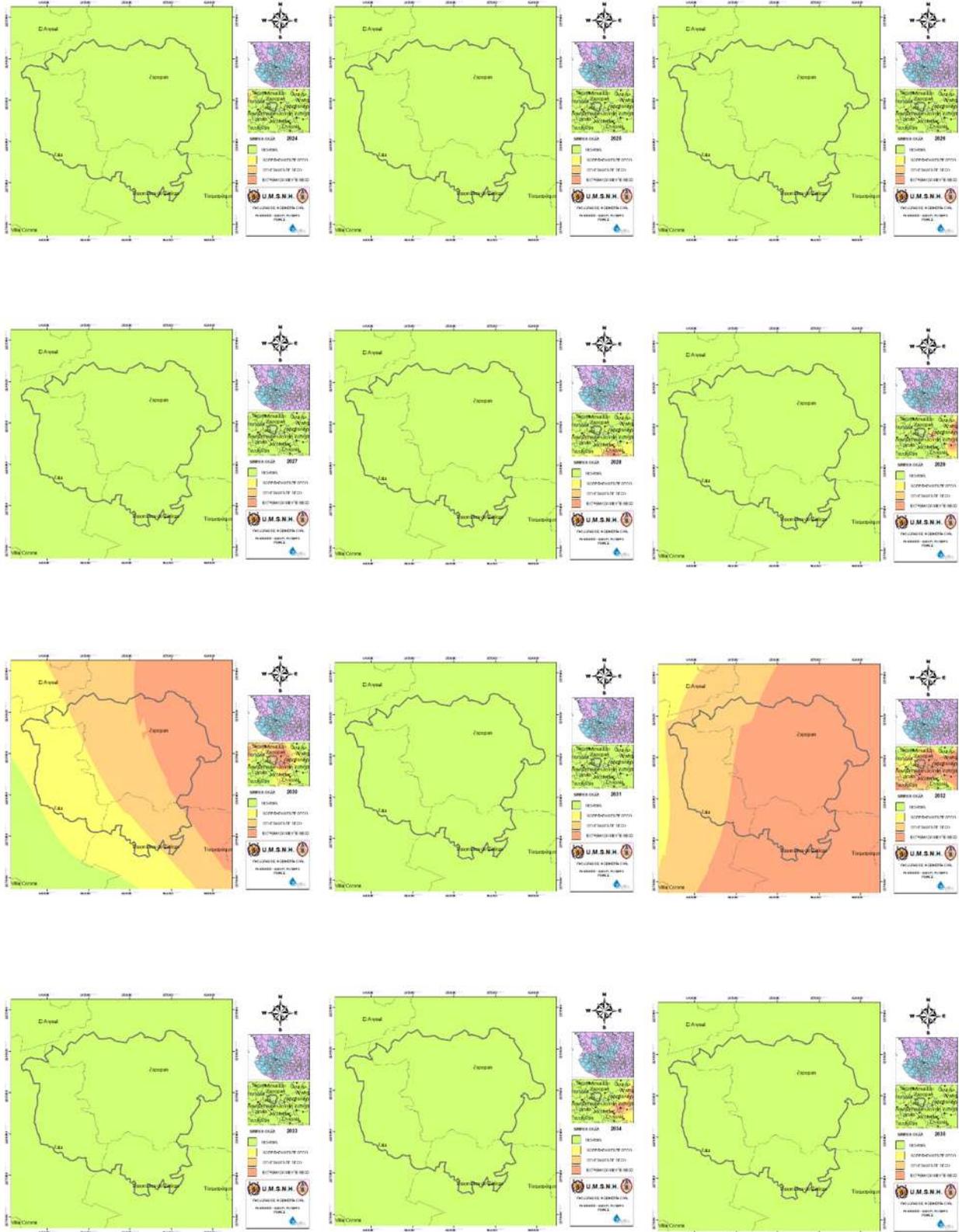
### 3.7.2 SPI PERIODO FUTURO CON CAMBIO CLIMÁTICO

Se modelaron los distintos periodos de tiempo 2015-2039, 2045-2069, 2075-2099 para los RCP de 4.5 y de 8.5 tanto para sequía como para humedad.

#### 3.7.2.1 SPI: PERIODO 2015-2039, 2045-2069, 2075-2099 RCP 4.5

Figura 3.20 Evolución espacial de sequías SPI 2015-2039 RCP 4.5





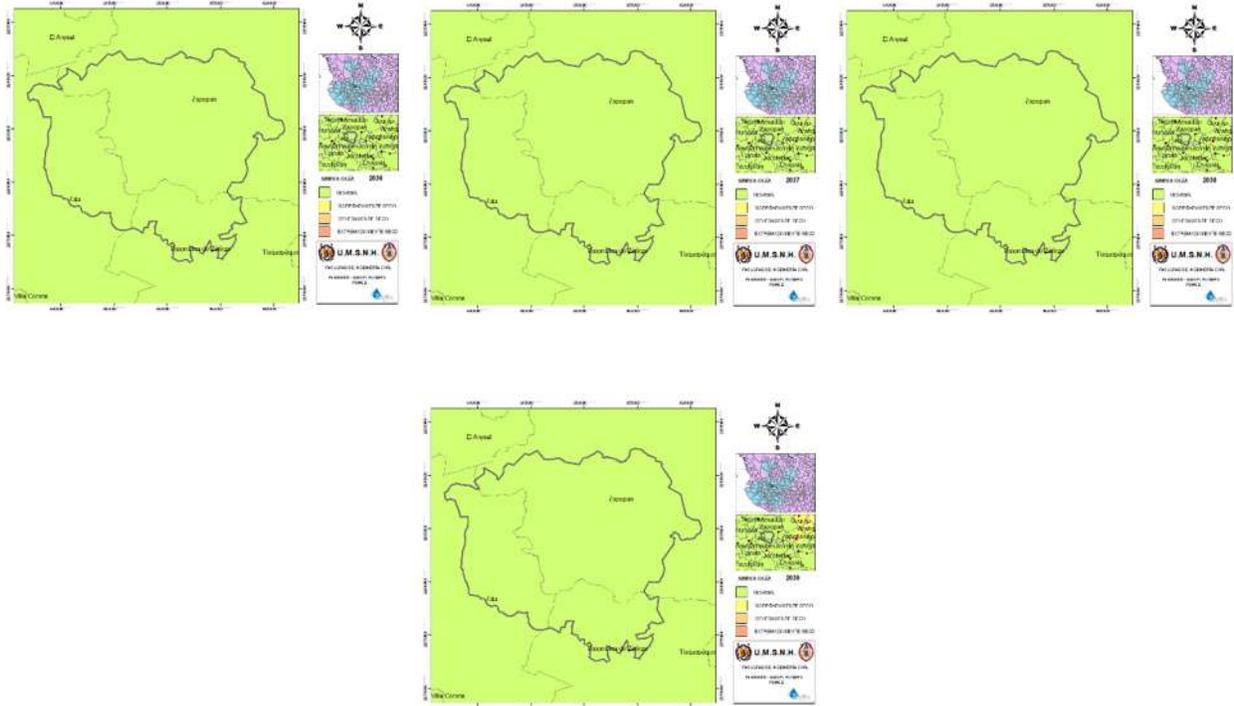
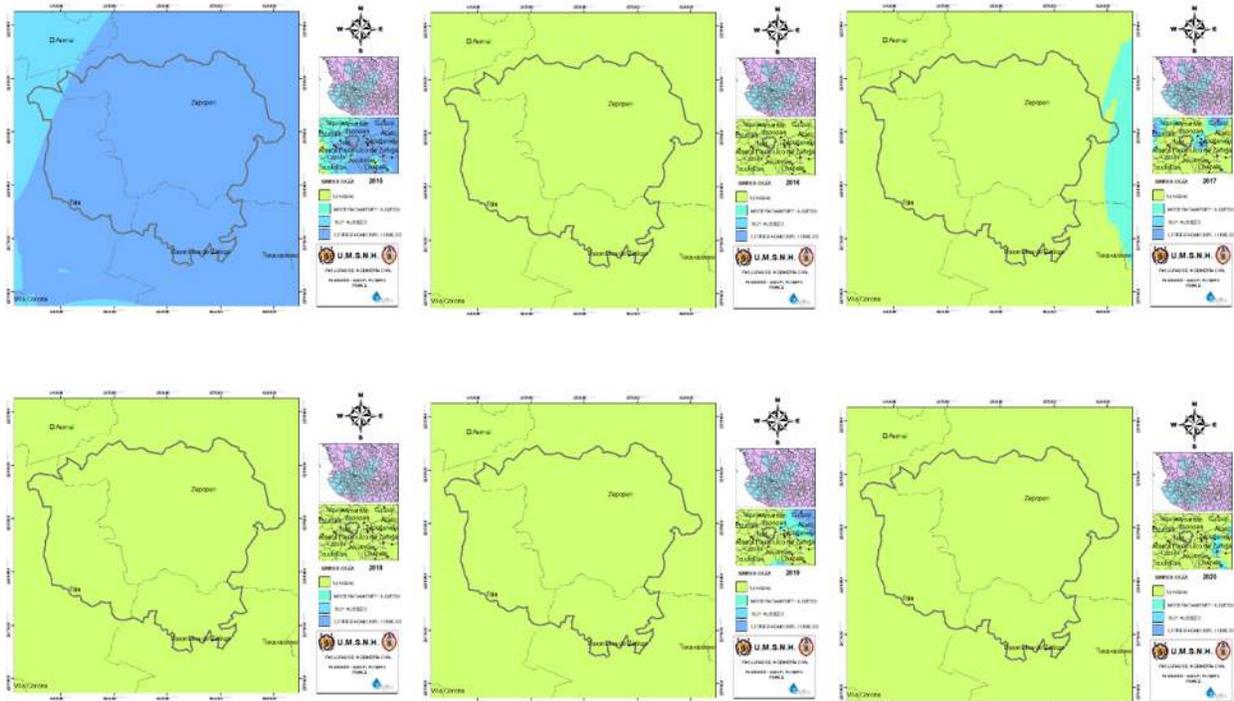
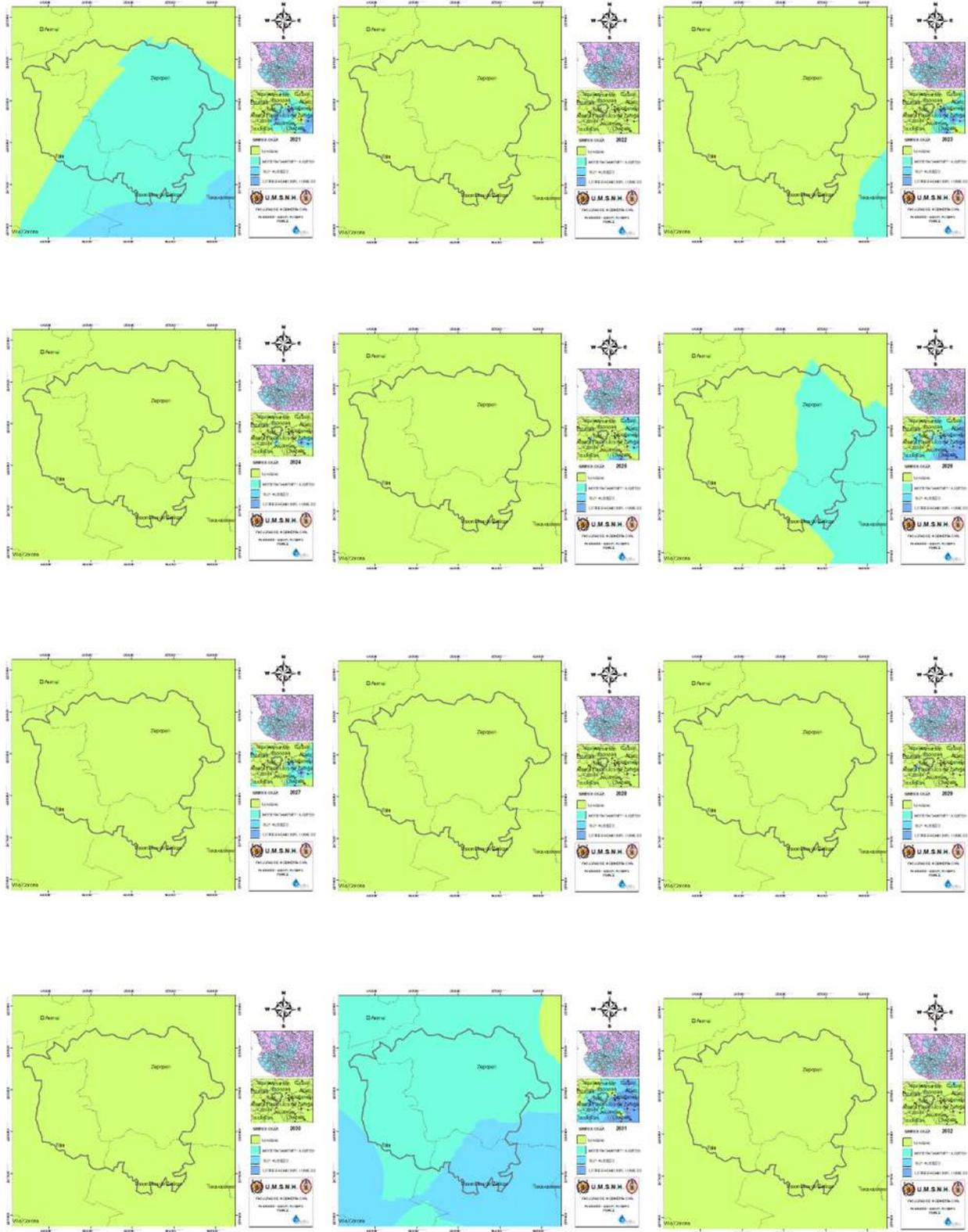


Figura 3.21 Evolución espacial de humedad SPI 2015-2039 RCP 4.5





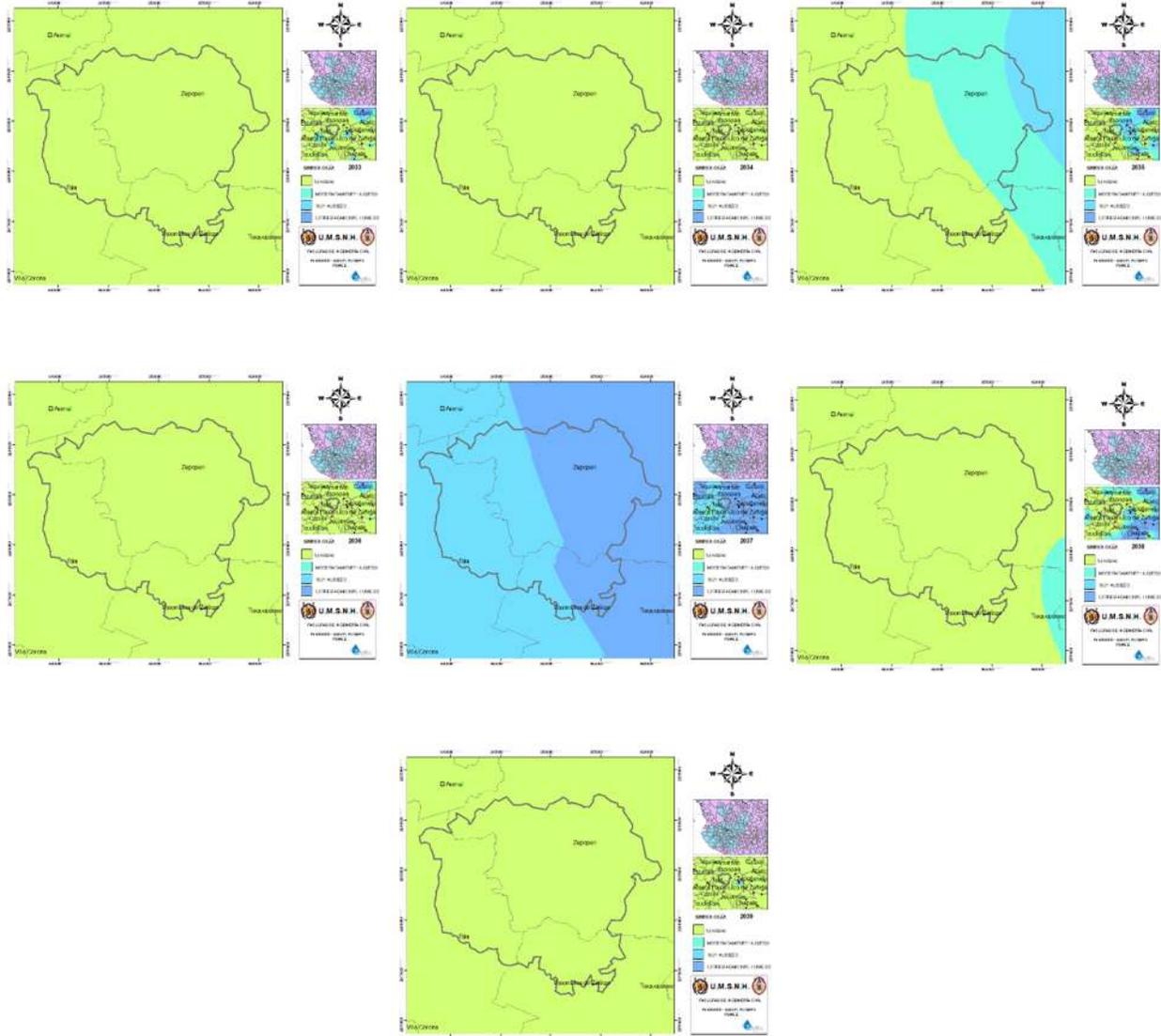
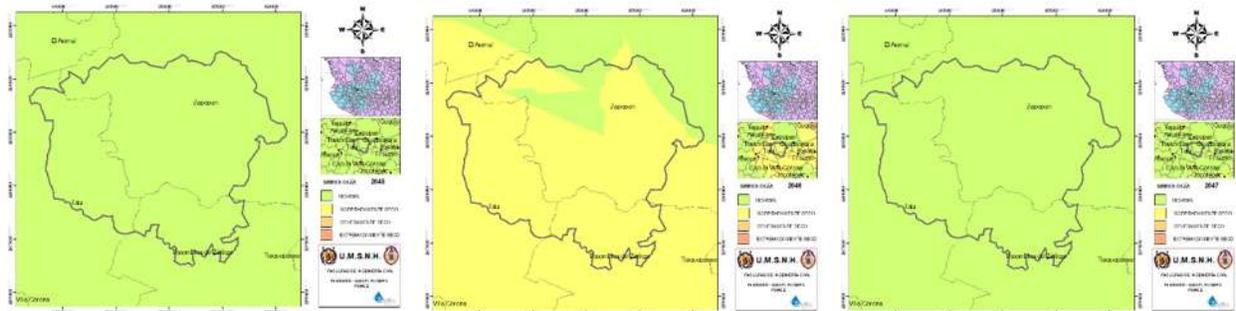


Figura 3.22 Evolución espacial de sequías SPI 2045-2069 RCP 4.5



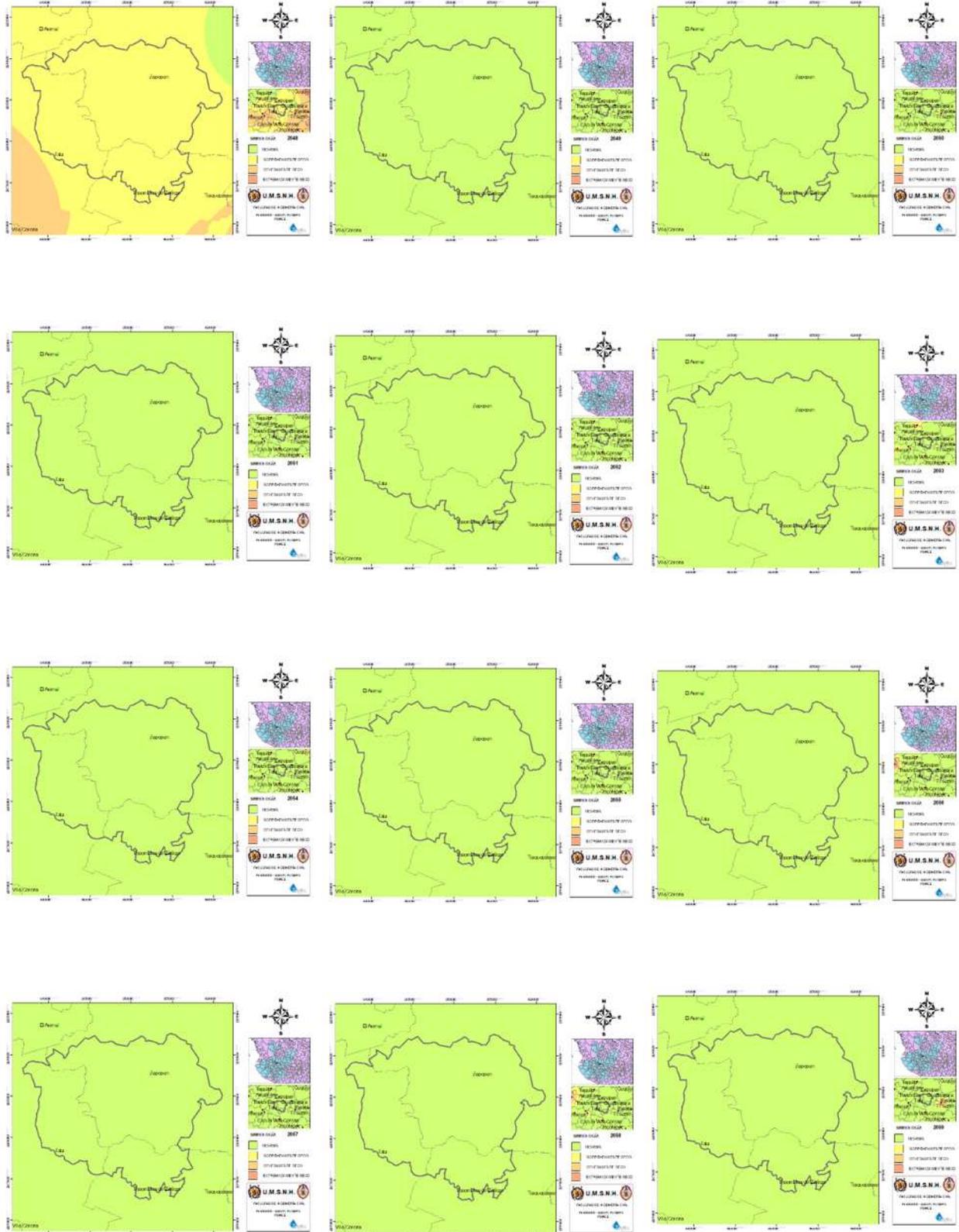




Figura 3.23 Evolución espacial de humedad SPI 2045-2069 RCP 4.5





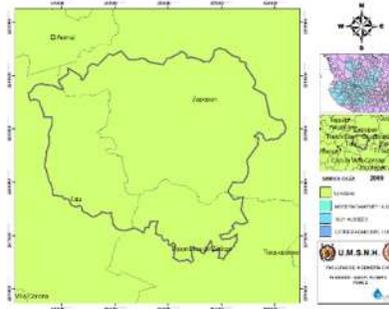
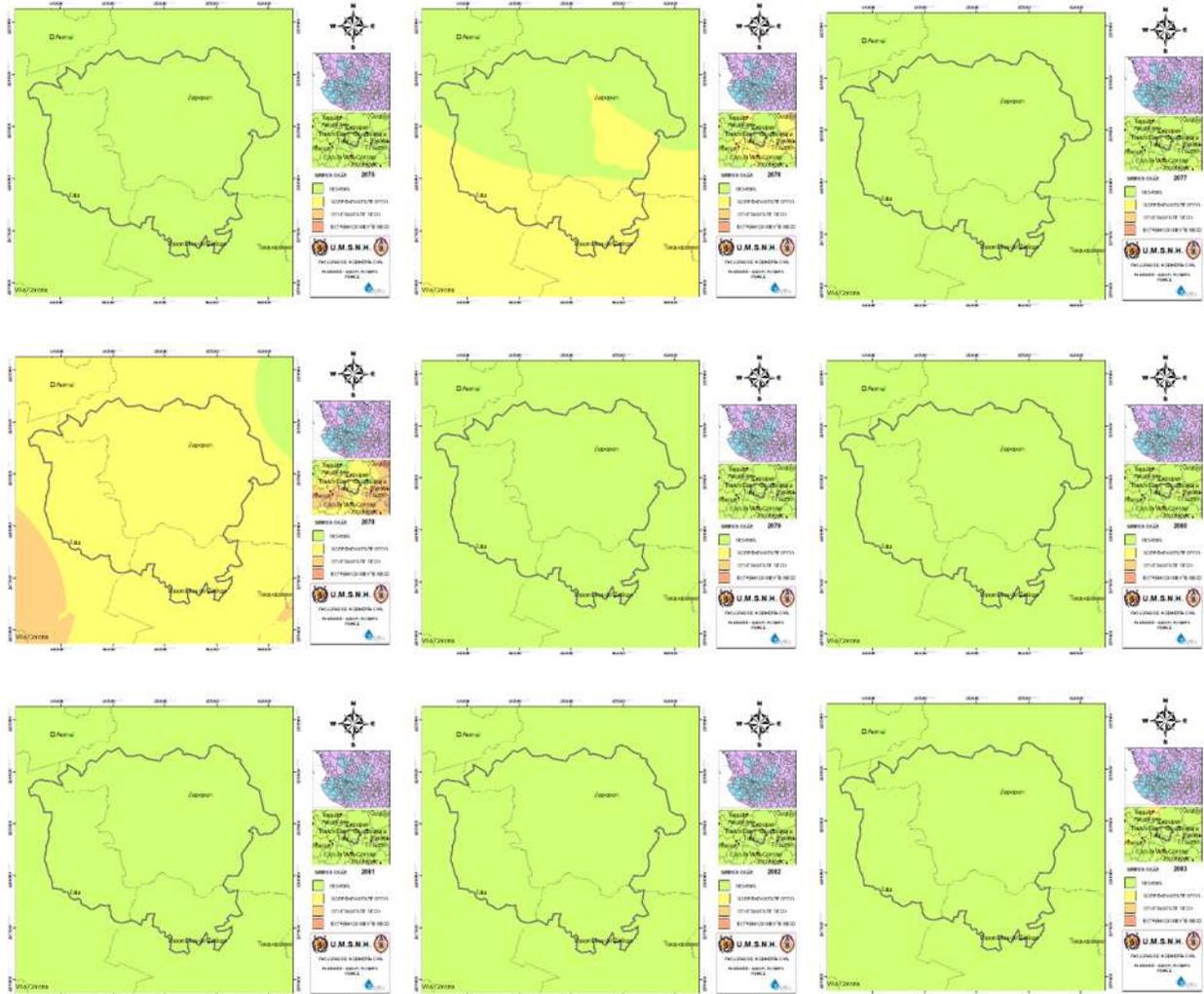
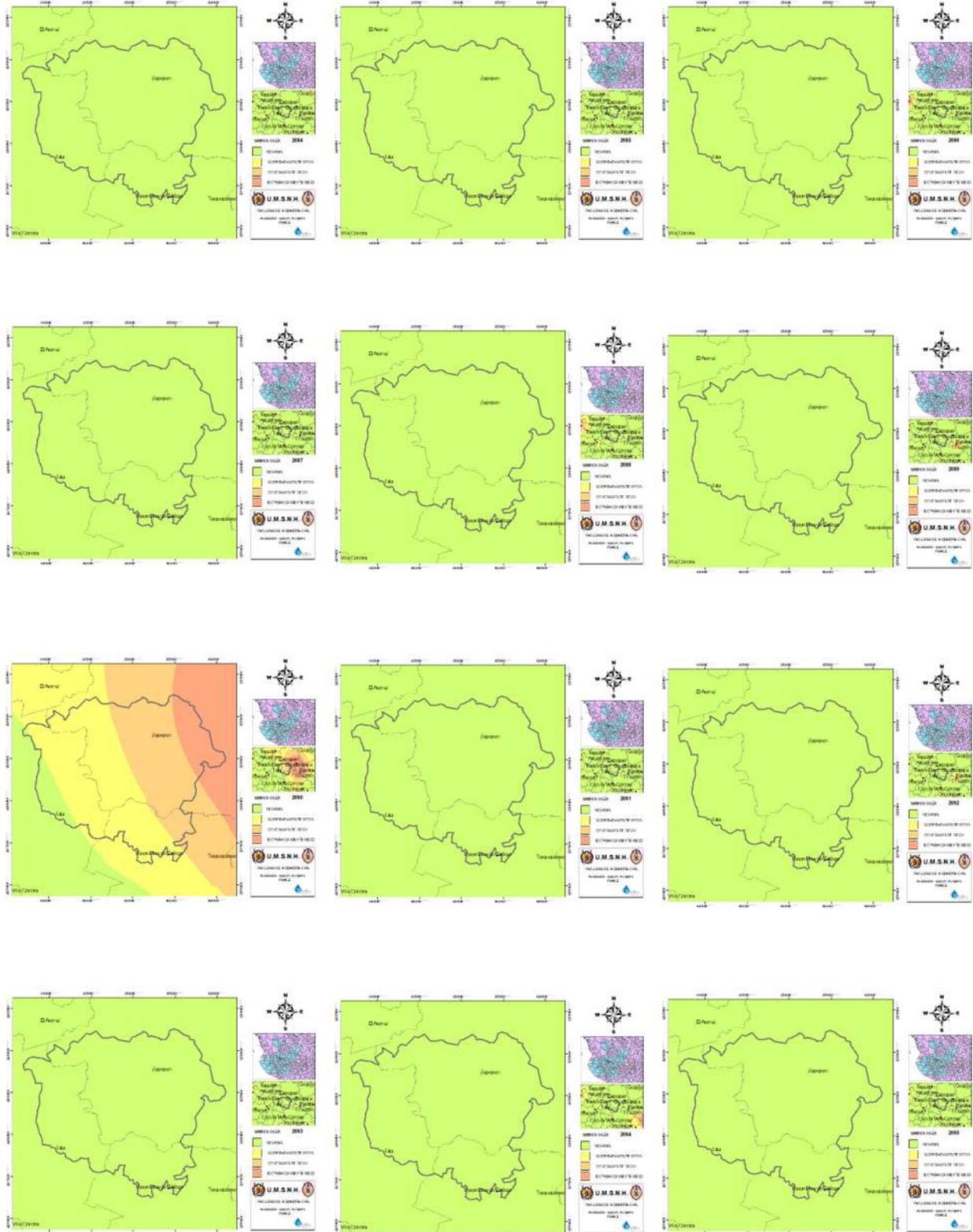


Figura 3.24 Evolución espacial de sequías SPI 2075-2099 RCP 4.5





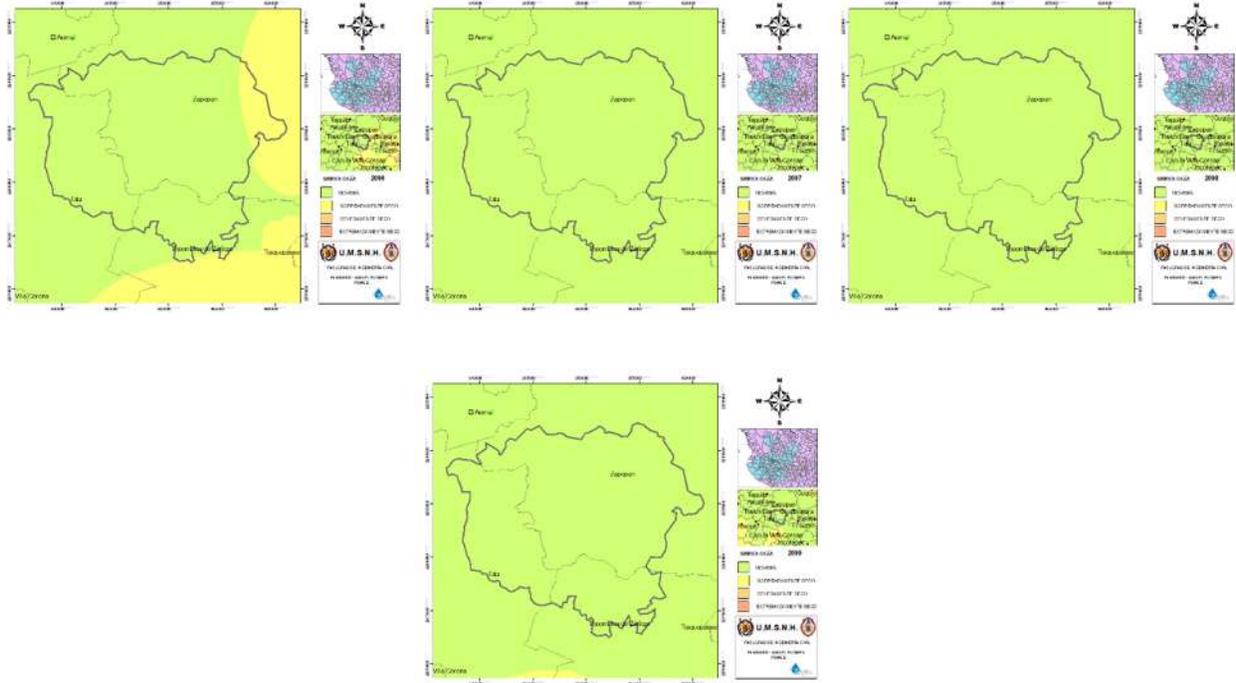
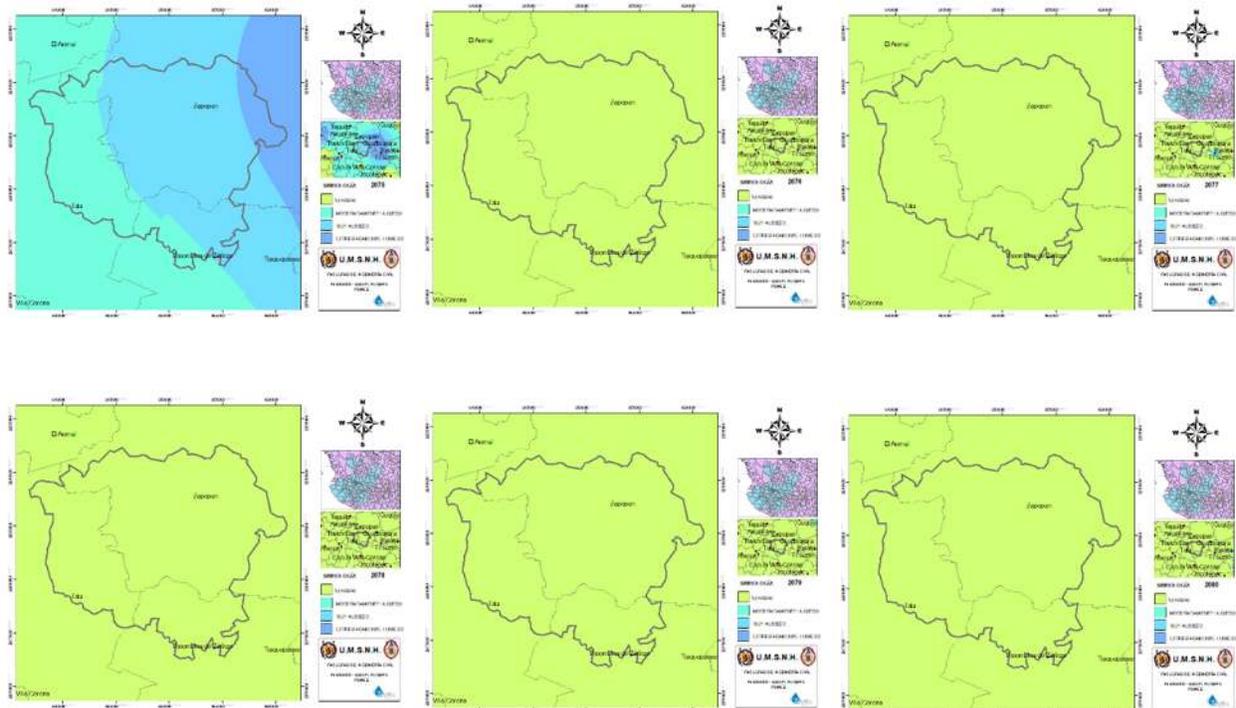
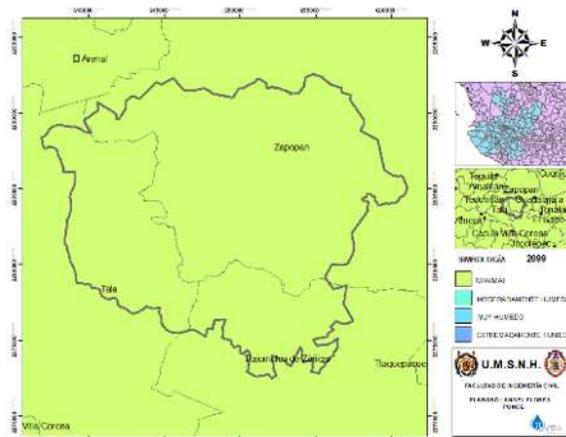
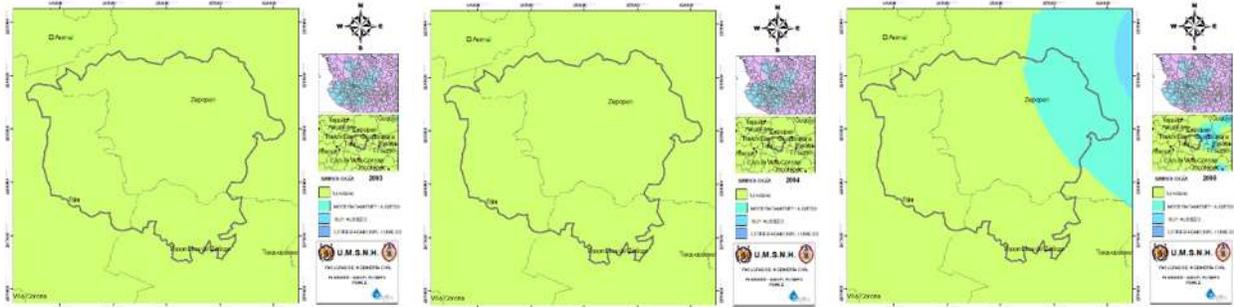


Figura 3.25 Evolución espacial de humedad SPI 2075-2099 RCP 4.5

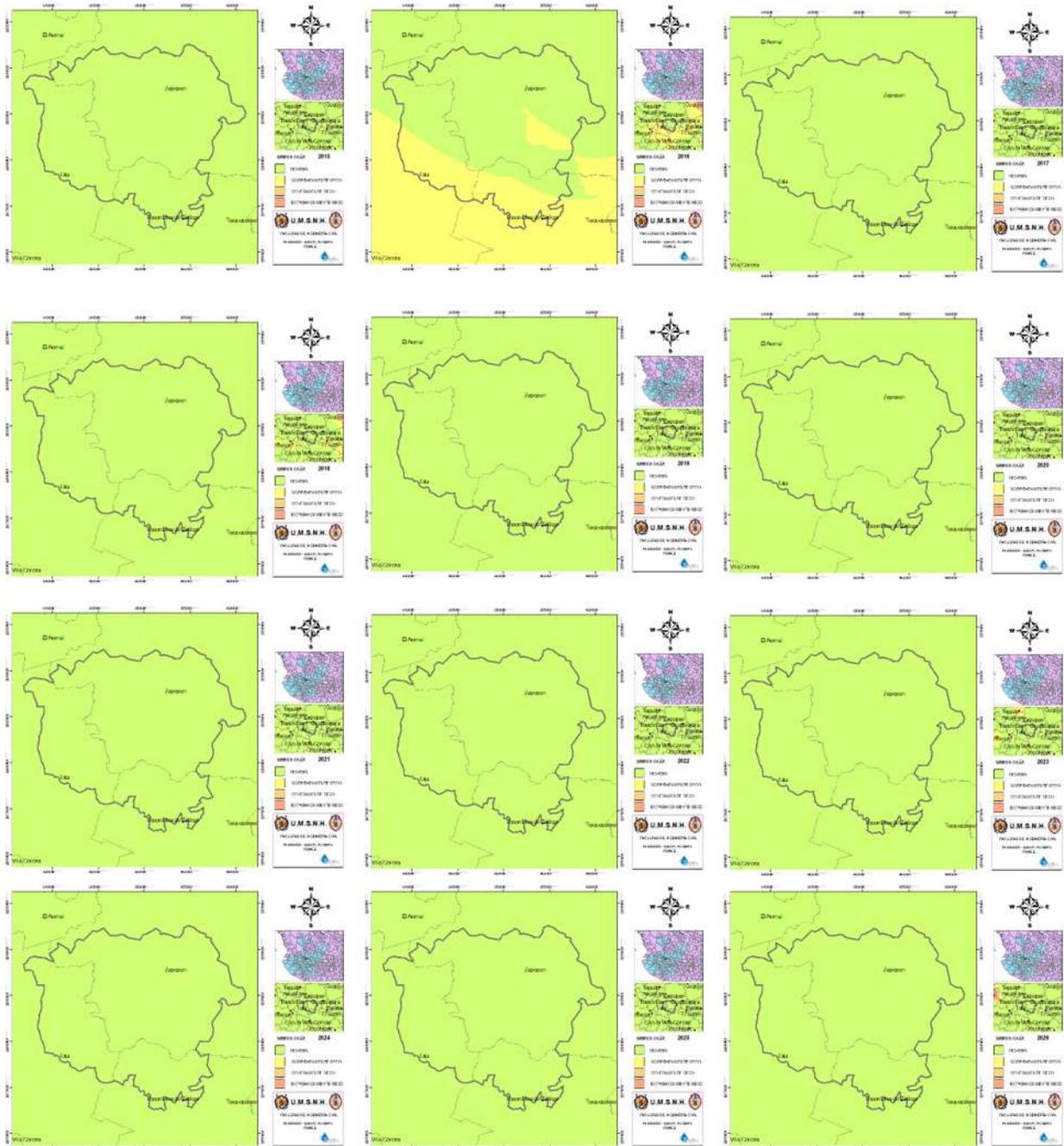


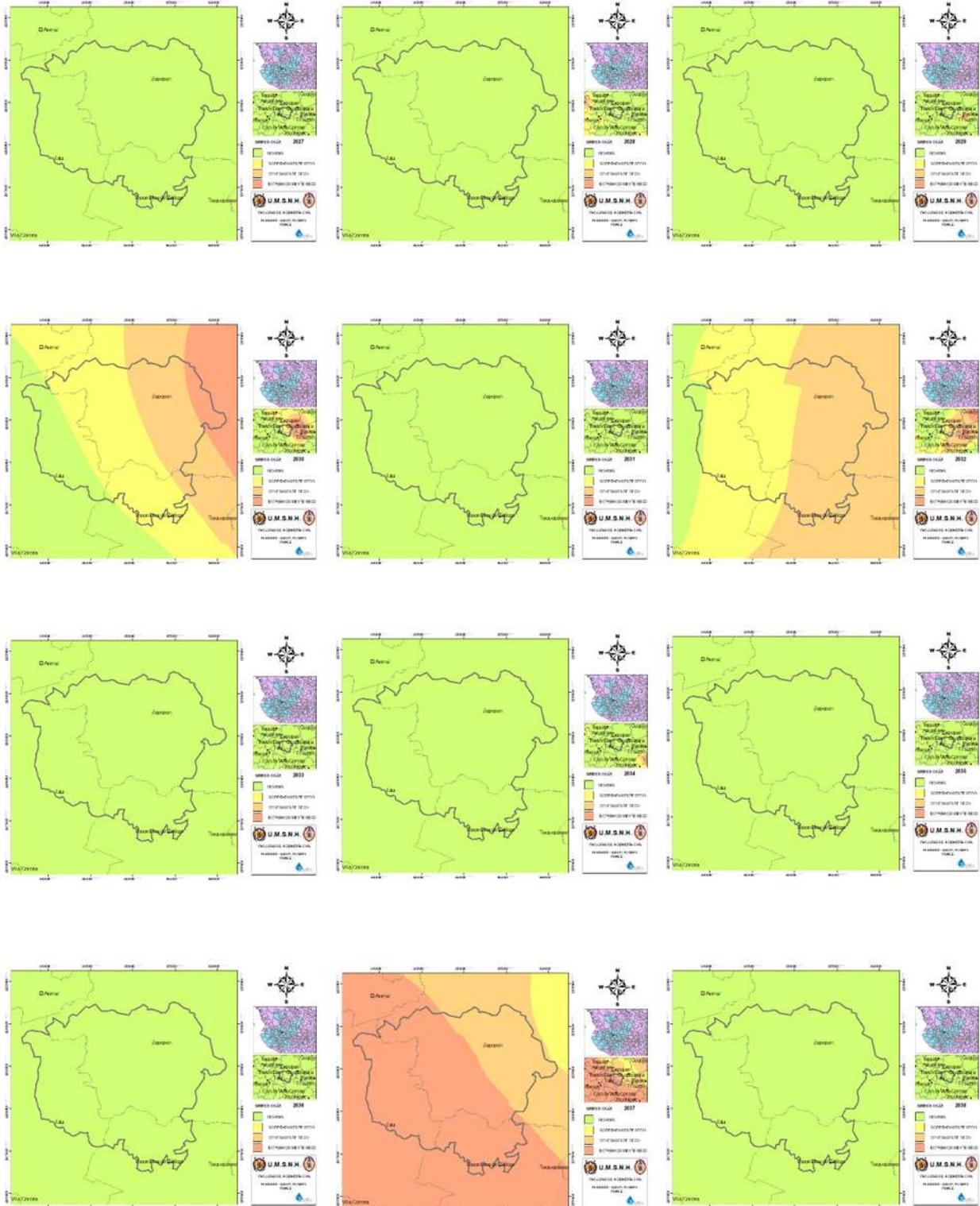




### 3.7.2.2 SPI: PERIODO 2015-2039, 2075-2099 RCP 8.5

Figura 3.26 Evolución espacial de sequías SPI 2015-2039 RCP 8.5





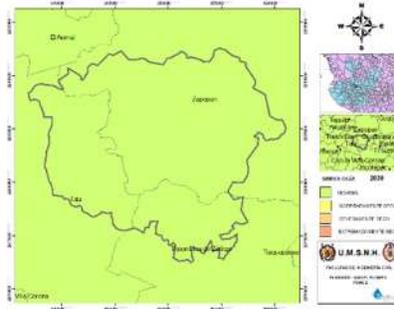
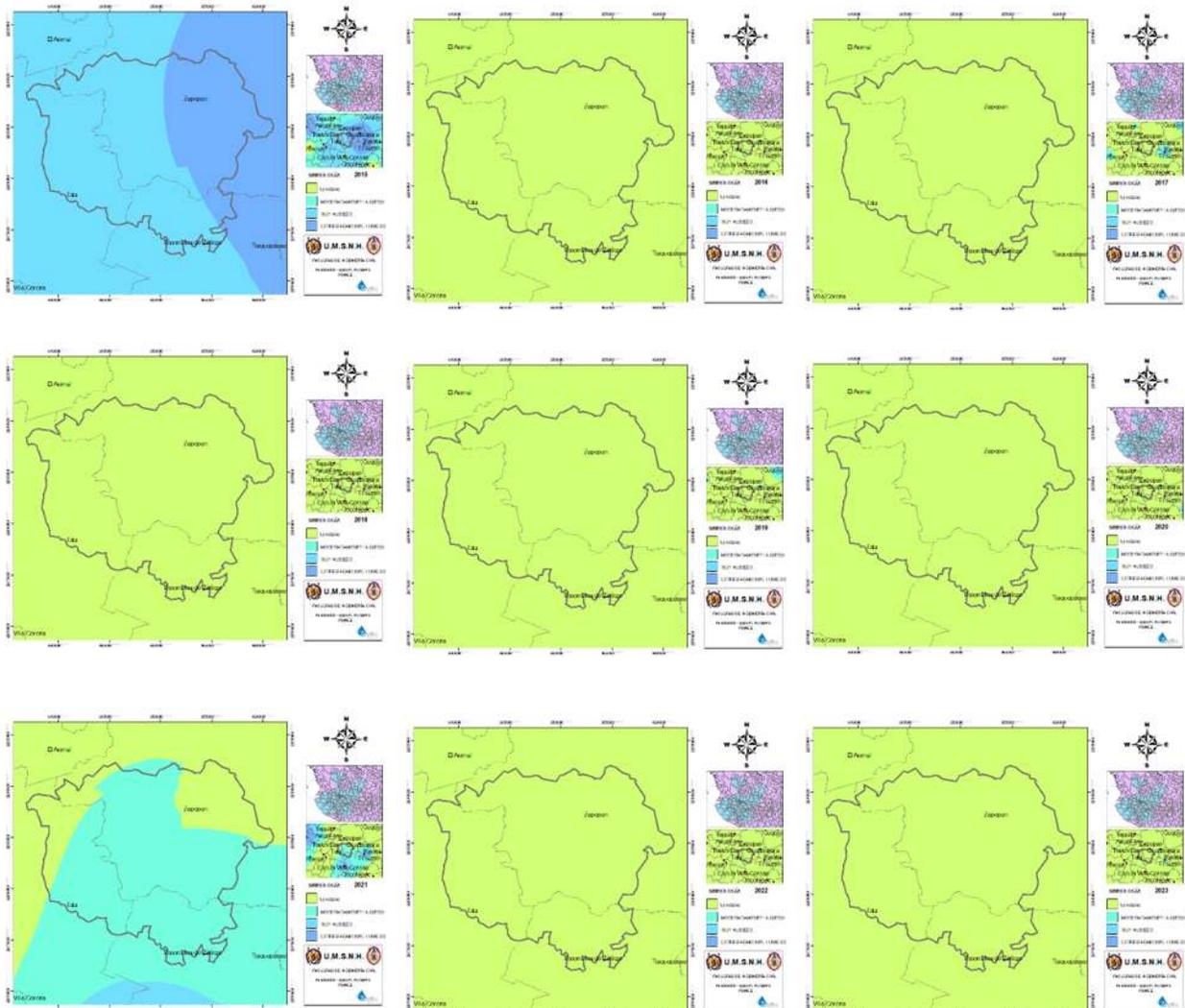
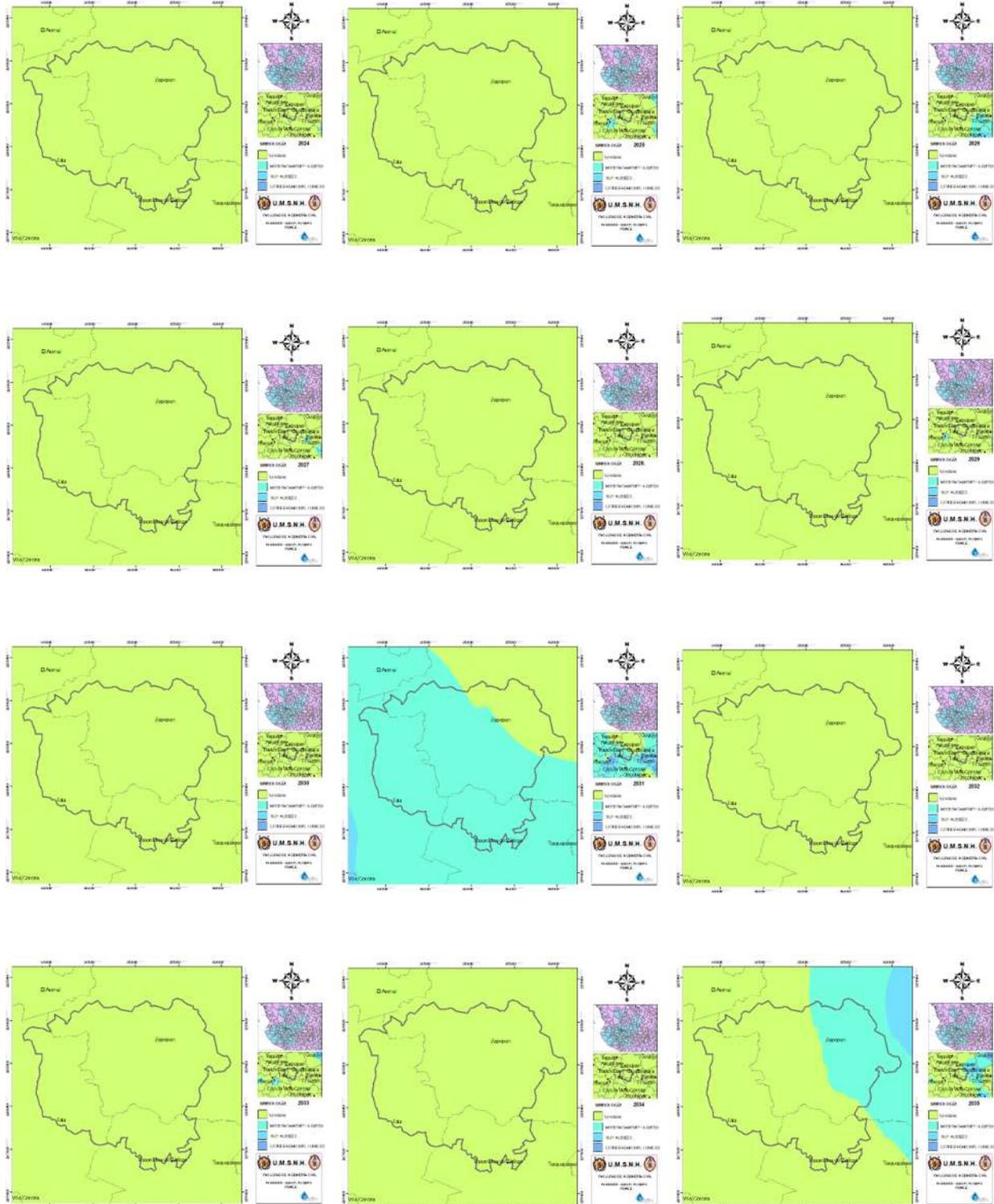


Figura 3.27 Evolución espacial de humedad SPI 2015-2039 RCP 8.5





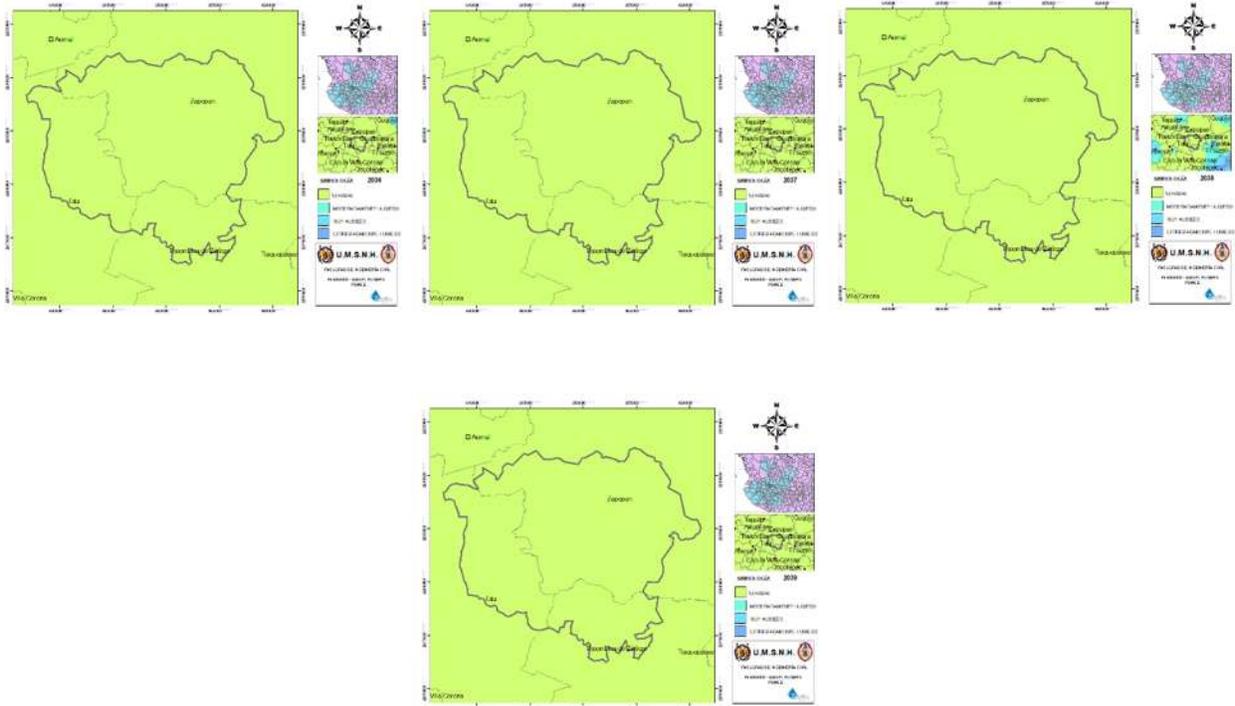


Figura 3.28 Evolución espacial de sequías SPI 2075-2099 RCP 8.5



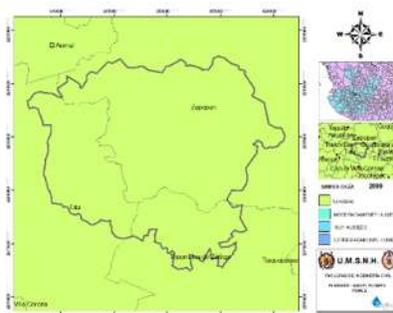




Figura 3.29 Evolución espacial de humedad SPI 2075-2099 RCP 8.5







## 4. DISCUSIÓN DE RESULTADOS

Los resultados que se obtuvieron mediante esta investigación al inicio eran algo confusos debido a que al hacer la comparación entre los escenarios de RCP de 4.5 y los RCP de 8.5 se esperaba que en las sequías se viera con mayor intensidad, así como una mayor cantidad de sequías, ya que la disminución de las precipitaciones son mucho mayor en los RCP de 8.5 que en los de 4.5 pero no fue así, prácticamente el número de sequías y de intensidades que se presentan son las mismas.

Sin en cambio al momento de aplicar los RCP de 4.5 y de 8.5 para las humedades se pudo apreciar que en el escenario de 8.5 las humedades eran menores a comparación que las del 4.5 con lo que se pudo comprender el que el escenario de 8.5 no presentaba más número de sequías o rangos más extremos que el 4.5, pero si presento mayor disminución en las humedades por lo cual la zona se ve más afectada por esta causa.

Lo más evidente en la investigación fue el hecho de que en efecto debido al cambio climático se presentaran sequías en el bosque La Primavera con intensidades que no se presentaron en un pasado, así como se ve la gran disminución de la humedad a comparación del periodo histórico en el cual el bosque conto con gran cantidad de humedad en su zona.

## 5. CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES

### 5.1 CONCLUSIONES GENERALES

Mediante esta investigación se concluye que la hipótesis planteada fue correcta, debido a que se pudo comprobar que el cambio climático en un futuro trae consigo mayor número de sequías y más intensas que las que se han vivido en el pasado en el bosque La Primavera, así como trae consigo una disminución en las humedades futuras comparadas con las históricas.

Se puede concluir que en México no se cuenta con la información adecuada y necesaria para este tipo de investigaciones, lo que hace más complicada la recolección de información y el uso de ella para poder aplicarla.

México es un país en el cual no se realizan los correctos estudios hídricos al momento de realizar obras y explotar los recursos naturales, así como el gobierno mexicano se protege diciendo que estamos bien ambientalmente creando zonas de área de protección de flora y fauna como lo es el bosque La Primavera, en el cual se esperaría que por ser área protegida este no tuviera afectaciones climáticas tan severas, pero por consumo desmedido de los recursos ambientales es que este tipo de regiones aunque no sean atacadas directamente, se ven afectadas en un futuro por todas estas problemáticas climáticas y lo peor de todo es que al no tener los estudios adecuados, no se combaten este tipo de problemáticas antes de que empiecen, si no que se quieren empezar a combatir hasta que ya son muy evidentes y catastróficas.

## 5.2 GESTIÓN DE DATOS

En México no contamos con sistemas de información meteorológica que este automatizada, por lo que la información con la que se cuenta no es de la mejor calidad ni la mayor cantidad deseada para poder trabajar con ella, y es por eso que nos vemos en la necesidad de trabajar con lo que se tiene y tratar de obtener la información faltante mediante el uso de programas como GESTAD para poder realizar estudios hídricos de la mejor calidad posible.

Es por esto que para este tipo de investigaciones de tener teóricamente noventa estaciones meteorológicas cerca de nuestra zona de estudio, de estas noventa solo se pueda trabajar con diecinueve estaciones las cuales fueron las que se les pudo hacer llenado de sus datos faltantes, haciendo que de esas noventa estaciones que existen en la zona solo diecinueve nos sirvan para estos estudios.

## 5.3 CAMBIO CLIMÁTICO

La falta de que México tenga su propio modelo de cambio climático, hace que la realización de este tipo de investigaciones se complique debido a que se tiene que buscar cual es el mejor modelo que se ajusta a la zona que se está investigando y aunque existan plataformas como el INECC que brindan los modelos que más dominan en la región mexicana, se tenga que trabajar con los 4 para poder ver cual se ajusta más a las condiciones o en su caso realizar un promedio de estos modelos para tener un valor más estándar para la zona de estudio.

Otra de las complicaciones que se tiene es el hecho de que la plataforma no cuenta con toda la información necesaria así como fue el caso de la información meteorológica, hay

periodos de tiempo como el de 2045-2069 del RCP 8.5 para precipitación del cual no se cuenta en la plataforma y se requiere trabajar solo con los existentes.

## 5.4 SEQUÍAS

Existen una gran variedad de sequías y para su obtención se tienen una gran cantidad de índices, pero uno de ellos es el SPI el cual es el más utilizado y el que propone la OMM, debido a que con su fácil uso no solo se obtienen las sequías sino también las humedades, lo cual es de gran importancia y función, como lo fue para esta investigación, para poder apreciar que posiblemente el número o intensidad de sequias no sea tan grande a futuro como se espera pero la disminución de las humedades es evidente y con esto se puede comprobar y concluir que en efecto el cambio climático genera afectaciones en las series de precipitación en la zona.

## 5.5 RECOMENDACIONES

Las recomendaciones que se tienen para investigaciones futuras es el encontrar la manera perfecta de aplicar el cambio climático para las series futuras de precipitación para que esta afectación sea lo más real posible aplicando este cambio a cada una de las estaciones con las que se esté trabajando de la manera porcentual más adecuada, teniendo el debido cuidado de que las estaciones sean afectadas en la cantidad que les corresponde a cada una.

Así como encontrar el modelo de afectación de cada parte de la zona de investigación para tener un modelo más detallado de sus cambios climáticos posibles en las zonas estudiadas.

## 6. BIBLIOGRAFÍA

- Agnew, C. (2000). *Using the SPI to Identify drought*. Drought Network News. .
- BLP. (2019). *Bosque La Primavera*. Obtenido de <http://www.bosquelaprimavera.com/index.php>
- Cavazos, T. J. (2013). *Actualización de Escenarios de Cambio Climático para México como parte de los productos de la Quinta Comunicación Nacional*. Obtenido de INECC: <http://escenarios.inecc.gob.mx/index2.html>
- CLICOM. (2018). *Climate Computing Project* . Obtenido de CICESE: <http://clicom-mex.cicese.mx/>
- CONANP. (2000). Programa De Manejo Area De Proteccion De Flora Y Fauna La Primavera. En C. N. Protegidas. México.
- Escalante, C., & Reyes, L. (2002). *Técnicas Estadísticas en Hidrología* . Ciudad de México: Universidad Nacional Autónoma de México. .
- Fernández, B. (2005). *SEQUÍAS: Caracterización y Mitigación*. México.
- García Romero , L. (2015). *Evaluación del impacto del cambio climático en los recursos hídricos en la cuenca del río Tuxpan, Michoacán*. Morelia.
- Gobierno de Jalisco. (2019). *Bosque La Primavera*. Obtenido de Bosque La Primavera.: <http://bosquelaprimavera.com/social.php>
- González Arreguín, I. (2018). *Evaluación del riesgo de sequía operativa, en el sistema de recursos hídricos de la cuenca del río Tepalcatepec*. Morelia, Michoacán México .
- Guttman, N. (1998). *Comparing the Palmer Drought Index and the Standardized Precipitation Index*. Journal of the American Water Resources Association.

- Guttman, N. (1999). *Accepting the Standardized Precipitation Index: a calculation algorithm*. . Journal of the American Water Resources Association.
- Hayes, M. M. (2011). *The Lincoln Declaration on Drought Indices: universal meteorological drought index recommended*. Bulletin of the American Meteorological Society,.
- INECC. (2018). *Instituto Nacional de Ecología y Cambio Climático*. Obtenido de INECC: <https://www.gob.mx/inecc>
- INEGI. (2017). *Instituto Nacional de Estadística, Geografía e Informática*. (INEGI) Obtenido de <http://www.beta.inegi.org.mx/inegi.html>
- Martínez , J., & Fernández, B. (2004). Cambio climático una visión desde México. En *Secretaría del medio ambiente y recursos naturales e instituto nacional de ecología*. México D.F.
- Martínez Alfaro, P., Martínez Santos, P., & Castaño Castaño, S. (2005). *Fundamentos de hidrogeología*. Madrid: Mundi-Prensa.
- McKee, T. N. (1993). *The Relationship of Drought Frequency and Duration to Time Scales*. *Actas de la 8ª Conferencia sobre Climatología Aplicada, 17 a 22 de enero de 199*. Anaheim, CA. Boston: American Meteorological Society.
- Méndez, P., & Magaña, R. (2010). *Regional aspects of meteorological droughts over México and Central America*. American Meteorological Society.
- Montreal, P. d. (2019). *UNEP*. Obtenido de United Nations Environment Programme: <http://ozone.unep.org/spanish/>
- Navarro Farfán, M. (2019). *Evaluación con cambio climático de escenarios de demanda para las masas subterráneas en los acuíferos asociados al campo geotérmico cerritos colorados*. Morelia, Michoacán México.

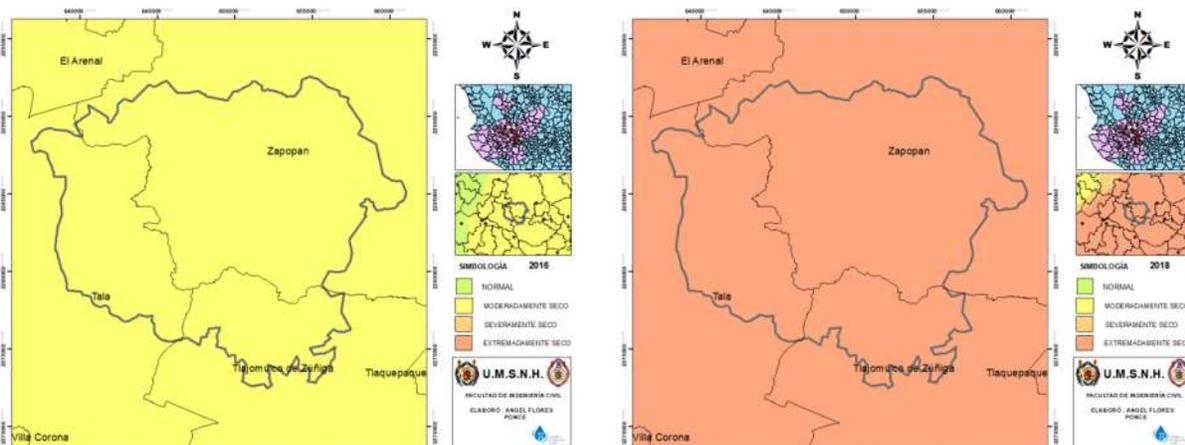
- NDMC, N. (2006). *What is drought? Understanding and Defining Drought*. University of Nebraska-Lincoln.
- NU. (2018). *NACIONES UNIDAS*. Obtenido de NACIONES UNIDAS:  
<http://www.un.org/es/sections/issues-depth/climate-change/index.html>
- OMM, O. (2016). *Manual de indicadores e índices de sequía*. Ginebra: OMM.
- SEGOB, S. (2000). *Desastres naturales: Sequías*. . México: Secretaría de Gobernación.
- Torres Martínez, J. (2014). *Análisis de los eventos extremos ocasionados por el cambio climático en la cuenca del lago Cuitzeo*. Morelia, Michoacán México.
- Wilhite, D., & Glantz, M. (1985). *Understanding the drought phenomenon: the role of definitions*. *Water international*.
- WWF. (2018). *WWF*. Obtenido de WWF:  
[http://www.wwf.org.mx/que\\_hacemos/cambio\\_climatico\\_y\\_energia/](http://www.wwf.org.mx/que_hacemos/cambio_climatico_y_energia/)

## 7. ANEXOS

### 7.1 ANEXO CAMBIO CLIMÁTICO MODELO DE FRANCIA

Se realizó la comparación del escenario de RCP de 4.5 periodo 2015-2039 de cambio climático mediante el modelo de Francia y el modelo obtenido mediante el promedio de los cuatro modelos del cual se tuvo que trabajan de una manera muy similar, pero mejor distribuido espacialmente el de los cuatro modelos por lo que se trabajó con este, pero se anexan los mapas obtenidos del modelo de Francia.

*Figura 7.1 Años que presentaron sequía en la evolución espacial de sequías SPI 2015-2039 RCP 4.5  
Modelo de Francia*



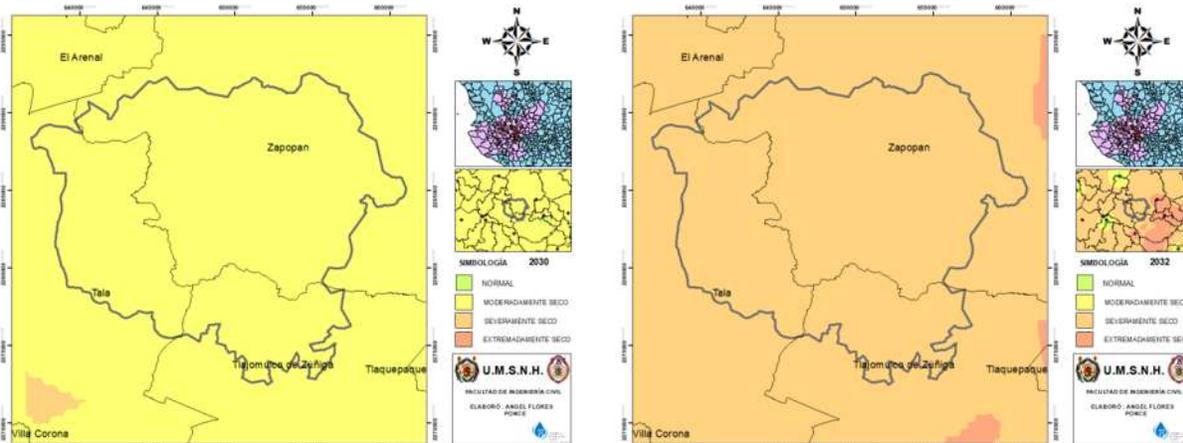


Figura 7.2 Años que presentaron humedad en la evolución espacial de humedad SPI 2015-2039 RCP 4.5 Modelo de Francia

