



COLEGIO DE POSTGRADUADOS

INSTITUCIÓN DE ENSEÑANZA E INVESTIGACIÓN EN CIENCIAS AGRÍCOLAS

CAMPUS MONTECILLO

POSTGRADO EN HIDROCIENCIAS

**ANÁLISIS DE LA PRESENCIA
HISTÓRICA DE SEQUÍA
METEOROLÓGICA EN LA CUENCA
DEL RÍO NAZAS**

HÉCTOR MANUEL CERVANTES GAETA

T E S I S

PRESENTADA COMO REQUISITO PARCIAL

PARA OBTENER EL GRADO DE:

MAESTRO EN CIENCIAS

MONTECILLO, TEXCOCO, ESTADO DE MÉXICO

2021

La presente tesis titulada: “**Análisis de la presencia histórica de sequía meteorológica en la cuenca del río Nazas**”, realizada por el (la) alumno (a): **Héctor Manuel Cervantes Gaeta**, bajo la dirección del Consejo Particular indicado, ha sido aprobada por el mismo y aceptada como requisito parcial para obtener el grado de:

MAESTRO EN CIENCIAS
HIDROCIENCIAS

CONSEJO PARTICULAR

CONSEJERO

(A)



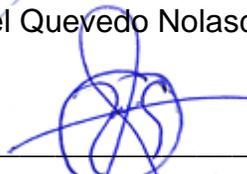
Dr. Martín Alejandro Bolaños González

ASESOR (A)



Dr. Abel Quevedo Nolasco

ASESOR (A)



Dr. Rodrigo Roblero Hidalgo

Montecillo, Texcoco, Estado de México, 09 de marzo de 2021



ANÁLISIS DE LA PRESENCIA HISTÓRICA DE SEQUÍA METEOROLÓGICA EN LA CUENCA DEL RÍO NAZAS

Héctor Manuel Cervantes Gaeta, M.C.

Colegio de Postgraduados, 2021

RESUMEN

El fenómeno natural de la sequía es el evento hidrometeorológico que más afecta a nivel global. La sequía meteorológica se define como la disminución o escasez de las precipitaciones pluviales de una zona determinada, este fenómeno en México, principalmente en los estados del norte donde predominan las zonas áridas y semiáridas se ha visto de manera más persistente y normal, presentándose cada año con diferente intensidad y magnitud.

Por lo anterior, el objetivo principal de este trabajo fue el análisis de la presencia histórica de periodos de sequía utilizando los indicadores: Índice Estandarizado de Precipitación (SPI) e Índice Estandarizado de Precipitación-Evapotranspiración (SPEI), en el periodo de 1964-2016 en la cuenca del río Nazas, en los estados de Durango y Coahuila. La metodología empleada se dividió en: delimitación y mapa base de la cuenca a partir del sistema de drenaje, localización y obtención de datos de las estaciones climatológicas y homogenización de las series climáticas de las variables precipitación y temperatura utilizando el *script HOMER.R*, donde se obtuvieron 14 estaciones climatológicas con un periodo evaluado de 56 años; con la finalidad de tener datos de alta calidad, además, se calcularon los indicadores de SPI y SPEI a escalas temporales de 6 y 12 meses donde se obtuvo un 18% promedio de periodos secos en la etapa evaluada, con base en la duración de sequía de ambos índices. Finalmente, se determinó que el SPEI arrojó datos más precisos que el SPI, debido a que en el primero se toma en consideración las variables precipitación y temperatura, y en el SPI solo considera la variable precipitación.

Palabras clave: Sequía, SPI, SPEI, HOMER.



ANALYSIS OF THE HISTORICAL PRESENCE OF METEOROLOGICAL DROUGHT IN THE NAZAS RIVER BASIN

Héctor Manuel Cervantes Gaeta, M.C.

Colegio de Postgraduados, 2021

ABSTRACT

The natural phenomenon of droughts is the hydrometeorological event that most affects globally. Meteorological drought is defined as the decrease or scarcity of rainfall in a specific zone, this phenomenon in México, mainly in the northern states where arid and semi-arid zones predominate, has been occurring in a persistent and normal way, occurring every year with different intensity and magnitude.

Therefore, the main objective of this work was the analysis of the historical presence of drought periods, using the following indicators: Standardized Precipitation index (SPI) and Standardized Precipitation - Evapotranspiration index (SPEI), in the period of 1964 to 2016 within the Nazas river basin, in the states of Durango and Coahuila. The methodology was divided into: delimitation and base map of the basin from the drainage system, location and data collection from the climatological stations and homogenization of the climatic series of the precipitation and temperature variables using the HOMER.R script; where 14 climatological stations were obtained during an evaluation period of 56 years. Moreover, to obtain high quality data, the SPI and SPEI indexes were calculated at time scales of 6 and 12 months, where an average of 18% dry periods was obtained during the evaluated stage, based on the duration of drought for both indexes. Finally, it was determined that the SPEI index yielded more precise data than the SPI, since the first one takes into account the precipitation and temperature variables, whereas the SPI only considers the variable of precipitation.

Key words: drought, SPI, SPEI, HOMER.



AGRADECIMIENTOS

Gracias a **Dios** por darme la oportunidad de una etapa profesional más en mi vida, además de cumplir y concluir con un sueño, por cuidarme y siempre estar presente.

A mis padres, **Manuel Cervantes y Ramona Gaeta** por el cariño y amor que siempre me han brindado.

A **Yared**, por ser la persona más especial en mi vida, este esfuerzo ha sido gran parte porque en todo momento estuviste para apoyarme, tus palabras siempre de motivación fueron un motor muy grande para seguir adelante, mis logros son tuyos.

A mi **familia**, porque siempre han sido mi cobijo y tranquilidad. A Itsel, Dayis, Marijose, Jaimito y Emi, por ser parte de mi vida.

Al **Consejo Nacional de Ciencia y Tecnología** (CONACYT), por financiar mis estudios de posgrado, así como el apoyo económico para realizar la estancia académica.

Al **Colegio de Postgraduados** y al **Posgrado de Hidrociencias**, por brindarme un espacio como alumno dentro de la Institución, así como también a la comunidad de profesores por compartir sus conocimientos y apoyar en mi formación académica.

Al **Dr. Martín A. Bolaños González**, por la dedicación y paciencia para dirigir la investigación, y estar presente en todo momento.

Al **Dr. Rodrigo Roblero Hidalgo** y Al **Dr. Abel Quevedo Nolasco**, por el tiempo que dedicaron para la revisión de la investigación, por su ayuda en el análisis de datos, y por los comentarios y contribuciones para el desarrollo de un mejor trabajo.

Al Instituto Pirenaico de Ecología del Consejo Superior de Investigaciones Científicas (IPE-CSIC), Zaragoza, España, en especial al **Dr. Sergio M. Vicente-Serrano**, por haberme dado la oportunidad de realizar mi estancia académica, por el tiempo invertido para el análisis de información, por la orientación, apoyo y aportaciones al trabajo de investigación.

A todos mis amigos, en especial mi gran amigo Javier Camacho y Uriel Castillo, porque a pesar que los años siguen su marcha su amistad y confianza ha perdurado, por siempre brindarme apoyo, por los buenos y malos momentos vividos.

A mis compañeros y amigos de Posgrado, en especial a Cristina por su amistad sincera.

A **Pascal** 🐾 mi amigo más fiel.

Con mucho cariño

Héctor Manuel Cervantes Gaeta



CONTENIDO

RESUMEN	iii
ABSTRACT.....	iv
LISTA DE CUADROS.....	x
LISTA DE FIGURAS.....	xii
1. INTRODUCCIÓN.....	1
2. OBJETIVOS	3
2.1. Objetivo general	3
2.2. Objetivos particulares.....	3
3. HIPÓTESIS.....	3
4. ANTECEDENTES	4
4.1. Causas que generan la sequía	4
4.2. Sequias en el mundo.....	4
4.3. Sequías en México.....	6
5. REVISIÓN DE LITERATURA.....	8
5.1. Ciclo hidrológico	8
5.2. Fases del ciclo hidrológico	10
5.3. Definición de clima	11
5.4. Cambio climático.....	12
5.5. Efecto invernadero	13
5.6. Fenómenos hidrometeorológicos	14
5.7. Definición de sequía.....	14
5.8. Clasificación de las sequías	16
5.9. Características de la sequia	18



5.10. Vulnerabilidad a la sequía	19
5.11. Índices de sequía	21
5.12. Índice de sequía de Palmer	24
5.13. Índice Estandarizado de Precipitación (SPI)	25
5.14. Índice de Precipitación Evapotranspiración Estandarizada (SPEI)	28
6. MATERIALES Y MÉTODOS	29
6.1. Materiales.....	29
6.1.1. Información meteorológica	29
6.1.2. Cartografía digital	30
6.1.3. Equipo de cómputo.....	30
6.1.4. Software	30
6.2. Métodos	30
6.2.1. Etapa 1: elaboración de mapa base	32
6.2.1.1. Área de estudio.....	32
6.2.1.2. Caracterización biofísica	32
6.2.1.3. Delimitación del área de estudio	33
6.2.1.4. Clima.....	33
6.2.1.5. Geomorfología	35
6.2.1.6. Sistemas de topoformas	36
6.2.1.7. Unidades edáficas.....	37
6.2.1.8. Uso de suelo y vegetación	39
6.2.1.9. Geología	41
6.2.1.10. Distrito de Riego 017.....	42
6.2.2. Análisis de la información meteorológica (precipitación y temperatura).....	42



6.2.2.1.	Estimación meteorológica	42
6.2.2.2.	Análisis de la información meteorológica	44
6.2.2.3.	Homogenización	45
6.2.2.4.	Homogenización de datos climáticos con el <i>script HOMER.R</i> de R.....	46
6.2.2.5.	Menú de inicio de HOMER.....	48
6.2.2.6.	Preparación de datos para HOMER.....	51
6.2.2.7.	Proceso de homogenización con HOMER.....	53
6.2.3.	Cálculo de índices de sequía.....	58
6.2.3.1.	Cálculo del Índice Estandarizado de Precipitación (SPI)	58
6.2.3.2.	Comandos en R para el cálculo del SPI.....	59
6.2.3.3.	Cálculo del Índice Estandarizado de Precipitación Evapotranspiración (SPEI)	64
6.2.3.4.	Cálculo de la evapotranspiración potencial (ETP).....	65
6.2.3.5.	Cálculo del SPEI	66
7.	ANÁLISIS DE RESULTADOS	68
7.1.	Resultados de la elaboración del mapa base.....	68
7.1.1.	Relieve de la cuenca del río Nazas	69
7.2.	Resultados del análisis de la información meteorológica	69
7.2.1.	Estaciones climatológicas.....	69
7.2.2.	Análisis de variables climatológicas.....	70
7.2.3.	Resultados del control de calidad de datos climáticos.....	70
7.2.4.	Resultados de la detección emparejada y detección conjunta	73
7.2.5.	Resultados de la corrección y datos faltantes	75
7.3.	Resultados del cálculo de los índices de sequía.....	76
7.3.1.	Selección del periodo de evaluación (1964-2016).....	76



7.3.2. Indicadores de sequía: SPI y SPEI.....	78
8. CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES	101
9. BIBLIOGRAFÍA.....	103
ANEXOS	111



LISTA DE CUADROS

Cuadro 1. Grandes desastres naturales en el mundo en términos de víctimas (1900 1998). Más de 1000 víctimas.	5
Cuadro 2. Grandes desastres naturales en el mundo en términos de pérdidas económicas (1976- 1998) en millones de dólares. (pérdidas mayores de 1,000 millones de dólares.).....	5
Cuadro 3. Efectos de la sequía en México durante el periodo de 1949 - 2000.	7
Cuadro 4. Indicadores de sequía.	22
Cuadro 5. Valores del índice normalizado de precipitación (spi).....	27
Cuadro 6. Subcuencas del río Nazas.....	33
Cuadro 7. Características de los grupos climáticos presentes en la cuenca del río Nazas	34
Cuadro 8. Sistema de topoformas de la cuenca del río Nazas.....	36
Cuadro 9. Unidades edafológicas de la cuenca del río Nazas.	38
Cuadro 10. Uso de suelo y vegetación de la cuenca del río Nazas.	39
Cuadro 11. Geología de la cuenca del río Nazas.....	41
Cuadro 12. Estaciones meteorológicas.....	42
Cuadro 13. Características generales de la cuenca del río Nazas.....	68
Cuadro 14. Sistema de drenaje de la cuenca del río Nazas.	69
Cuadro 15. Parámetros de relieve en la cuenca del río Nazas.	69
Cuadro 16. Homogenización de la variable precipitación mensual.	73
Cuadro 17. Homogenización de la variable temperatura mínima mensual.	74
Cuadro 18. Homogenización de la variable temperatura máxima mensual.	75
Cuadro 19. Estaciones climatológicas finales (1964-2016).....	76
Cuadro 20. Porcentajes de ocurrencia de periodos húmedos, normales y secos para las estaciones climatológicas evaluadas a través de los métodos SPI y SPEI en intervalos/escala de 12 meses.....	93
Cuadro 21. Periodos secos calculados con SPI y SPEI de 1964-2016.....	93
Cuadro 22. Estadística del indicador SPI por estación climatológica.	95



Cuadro 23. Estadística del indicador SPEI por estación climatológica.....	95
Cuadro 24. Porcentaje de intensidad de sequía de SPI para una escala temporal de seis meses.....	96
Cuadro 25. Porcentaje de intensidad de sequía de SPI para una escala temporal de seis meses.....	97
Cuadro 26. Porcentajes de ocurrencia de periodos húmedos, normales y secos para las estaciones climatológicas evaluadas a través de los métodos SPI y SPEI en intervalos/escala de seis meses.....	99
Cuadro 27. Comparativo de ocurrencias de periodos secos en las estaciones climatológicas evaluadas a través de los métodos SPI y SPEI en intervalos y/o escala de seis y doce meses.....	100



LISTA DE FIGURAS

Figura 1. Ciclo hidrológico.....	10
Figura 2. Esquema del efecto invernadero.....	14
Figura 3. Esquema de tipos de sequía.....	18
Figura 4. Diagrama de la metodología general.	32
Figura 5. Ubicación de la cuenca del río nazas (elaboración propia).	32
Figura 6. Diagrama del proceso de homogenización para series de tiempo.	46
Figura 7. Inicio del script homer.r en r.	47
Figura 8. Directorio de homer.....	47
Figura 9. Herramientas de homer.....	50
Figura 10. Formato del archivo del listado las estaciones climáticas.	51
Figura 11. Archivo en formato .txt de las estaciones climáticas por variable.	52
Figura 12. Formato de la estación por cada variable.	53
Figura 13. Aplicación de fast qc en la variable precipitación.	55
Figura 14. Aplicación de fast qc en la variable temperatura mínima.	55
Figura 15. Aplicación de fast qc en la variable temperatura máxima.	56
Figura 16. Gráfico de salida de la detección emparejada con homer en la estación 10048.....	57
Figura 17. Comando: importar datos a r.....	60
Figura 18. Comando: comprobar datos.....	60
Figura 19. Comando: ver las columnas.....	61
Figura 20. Comando: calculo del spi para la estación 10048.	62
Figura 21. Comando: grafica de datos del spi de la estación 10048.....	62
Figura 22. Comando: muestra el nombre de las estadísticas que contiene el cálculo.	63
Figura 23. Comando: contenido de los coeficientes del SPI.	63
Figura 24. Comando: resumen de los coeficientes estadísticas.....	64
Figura 25. Calculo de la evapotranspiración potencial.....	65
Figura 26. Nombre de las columnas de la estacion 10048.....	66
Figura 27. Grafica de los datos de la ETP de la estación 10048.....	66



Figura 28. Resultados del SPEI de la estación 10048.	67
Figura 29. Grafica de los valores del spei de la estación 10048.	67
Figura 30. Delimitación de las subcuencas en el río Nazas.	68
Figura 31. Ejemplo de outliers o valores atípicos en la precipitación mensual de la estación climatológica 10006.	72
Figura 32. Localización de las estaciones climatológicas (1964-2016).	77
Figura 33. Estación 5036, SPI y SPEI con escala temporal 12 meses.	79
Figura 34. Estación 10006, SPI y SPEI con escala temporal 12 meses.	80
Figura 35. Estación 10016, SPI y SPEI con escala temporal 12 meses.	81
Figura 36. Estación 10018, SPI y SPEI con escala temporal 12 meses.	82
Figura 37. Estación 10023, SPI y SPEI con escala temporal 12 meses.	83
Figura 38. Estación 10030, SPI y SPEI con escala temporal 12 meses.	84
Figura 39. Estación 10047, SPI y SPEI con escala temporal 12 meses.	85
Figura 40. Estación 10048, SPI y SPEI con escala temporal 12 meses.	86
Figura 41. Estación 10051, SPI y SPEI con escala temporal 12 meses.	87
Figura 42. Estación 10055, SPI y SPEI con escala temporal 12 meses.	88
Figura 43. Estación 10076, SPI y SPEI con escala temporal 12 meses.	89
Figura 44. Estación 10090 SPI y SPEI con escala temporal 12 meses.	90
Figura 45. Estación 10093, SPI y SPEI con escala temporal 12 meses.	91
Figura 46. Estación 32038, SPI y SPEI con escala temporal 12 meses.	92



1. INTRODUCCIÓN

Las sequías a nivel global cada vez se están presentando de manera más recurrente y con mayor fuerza, afectando de manera directa a grandes superficies con un impacto económico alto. Este fenómeno hidrometeorológico es considerado como el desastre que mayor impacto tiene, debido a la extensión que afecta, su duración y magnitud (CONAGUA, 2014). Existen varias definiciones de sequía meteorológica, pero en general, esta se caracteriza por la reducción de la precipitación pluvial con respecto a la considerada como normal para una zona determinada; además, de no presentar trayectorias definidas ni epicentros, es decir, se extiende de manera irregular en tiempo y espacio, provocando de esta manera escasez de agua y así afectar las necesidades de los ecosistemas y humanas. (Florescano *et. al.*, 1980) y (Ortega *et. al.*, 2014),

En México, la sequía es un problema que ha persistido a lo largo de la historia, tal como lo muestran los registros documentados de sequias; este fenómeno se ha presentado en diversas regiones del país afectando en específico al norte, área con alta vulnerabilidad; debido a las condiciones de aridez que predominan y a las reducidas cantidades de precipitación de la región.

La cuenca del río Nazas se encuentra al norte del país entre los estados de Coahuila y Durango, siendo este último con el de mayor extensión territorial, y dada por su ubicación geográfica, está expuesta a eventos meteorológicos, cuya característica principal es la presencia de sequías, donde gran parte de su territorio es árido y semiárido; dejando graves consecuencias a la población y el ambiente, ocasionando deterioro en la producción agrícola y pecuario; además de origen antropogénico como los cambios de uso de suelo, sobreexplotación de los recursos forestales, ganadería extensiva, agricultura de riego y por último la alta demanda de agua por el crecimiento poblacional de la región (Contreras, 2005), (Esquivel, 2002) y (CONAGUA, 2014). Para mitigar los impactos negativos de este fenómeno, la Comisión Nacional del Agua (CONAGUA), a través de los Programas de Medidas



Preventivas y de Mitigación de la Sequía (PMPMS) por Consejos de Cuenca, busca minimizar impactos ambientales, económicos y sociales.

Por las razones expuestas, el presente estudio tiene por objetivo analizar la sequía meteorológica de la cuenca del río Nazas mediante el análisis de la información meteorológica (precipitación y temperatura) para determinar la presencia histórica e intensidad de este fenómeno en el periodo de 1964-2016, utilizando el Índice Estandarizado de Precipitación (SPI) y el Índice Estandarizado de Precipitación-Evapotranspiración (SPEI).



2. OBJETIVOS

2.1. Objetivo general

Analizar la presencia histórica de periodos de sequía en la cuenca del río Nazas por medio de los indicadores: Índice Estandarizado de Precipitación (SPI) e Índice Estandarizado de Precipitación-Evapotranspiración (SPEI).

2.2. Objetivos particulares

- Identificar y caracterizar la cuenca física de aporte del río Nazas.
- Analizar la calidad de la información de variables climatológicas precipitación y temperatura mediante el proceso de homogenización de series climatológicas.
- Analizar la presencia de sequía meteorológica en el periodo de 1964-2016 mediante los indicadores de sequía SPI y SPEI.

3. HIPÓTESIS

Mediante los indicadores de sequía: Índice Estandarizado de Precipitación (SPI) e Índice Estandarizado de Precipitación-Evapotranspiración (SPEI) es posible detectar y analizar la presencia de periodos de sequía en la cuenca de río Nazas.



4. ANTECEDENTES

La sequía es considerada como un fenómeno climático recurrente que se caracteriza por una reducción en la precipitación pluvial, que provoca que el agua disponible sea insuficiente para satisfacer las distintas necesidades humanas y de los ecosistemas, durante un tiempo y en una zona determinados (Ortega, 2012).

Ortega (2012) sugiere no confundir los conceptos de sequía y aridez. Así mismo, dicho autor define la sequía como un déficit temporal de la lluvia con relación a la considerada como “normal”, mientras que, aridez la define como una característica permanente de ciertos climas, como el que se presenta en la mayor parte del centro norte de México.

4.1. Causas que generan la sequía

Velasco *et. al.*, (2005) y Ortega *et. al.*, (2013) argumentan que las causas de la sequía se pueden clasificar en dos categorías: a) de origen natural, que representan las modificaciones en los patrones de la circulación atmosférica, las variaciones en la actividad solar y los fenómenos de interacción entre el océano y la atmósfera, como El Niño/ Oscilación del Sur (ENOS), entre otros; b) de origen antropogénico, constituidas por la quema de combustibles fósiles, la degradación ambiental (deforestación, degradación del suelo y desertificación) y la alteración de los sistemas ecológicos naturales.

Al fenómeno de la sequía se le conoce más por sus efectos que por sí mismo, pues los impactos ocasionados por la falta de lluvias y el déficit hídrico son similares en cualquier parte del mundo. Si bien es cierto que la sequía no es un fenómeno directo y de corto tiempo como otros eventos naturales (un huracán o un tornado, por ejemplo), sus impactos a largo plazo suelen ser de mayor amplitud y más devastadores (Ortega, 2012).

4.2. Sequias en el mundo



En cuanto a las estadísticas a nivel mundial, se ha escogido la información preparada por el Comité Alemán para la Década Internacional para la Reducción de Desastres Naturales; esta información es con base en distintas fuentes, principalmente relacionadas con la industria de seguros. En el Cuadro 1 y 2 se presentan los grandes desastres en lo que se refiere a sequía, los que han producido más de mil víctimas o pérdidas económicas superiores a mil millones de dólares. La regla es debatible, pero constituye al menos una referencia cuantitativa común. El catálogo de desastres por pérdidas de vidas abarca el siglo XX, mientras que el de pérdidas económicas comienza en 1976, por la dificultad de encontrar la información necesaria antes de dicha fecha. En términos de víctimas, destacan las enormes pérdidas debidas a las sequías en Asia y África (CENAPRED. 2001).

Cuadro 1. Grandes desastres naturales en el mundo en términos de víctimas (1900 1998). Más de 1000 víctimas.

Año	Desastre	País	Victimas
1900	Sequía	India	1,250,000
1928	Sequía	China	3,000,000
1942	Sequía	India	1,500,000
1943/44	Sequía	Bangladesh	3,000,000
1965/67	Sequía	India	1,500,000
1972/75	Sequía	Sahel / Etiopía	250,000
1984/85*	Sequía/ Guerra	Etiopía, Sudán, Chad	500,000
1992*	Sequía/ Guerra	Somalia	100,000
1992/93	Sequía	Brasil	10,000
1997	Hambre, inundación, sequía	Corea del Norte	100,000

Fuente: Comité alemán Decenio Internacional para la Reducción de Desastres Naturales (IDNDR por sus siglas en inglés). La lista se basa en varias fuentes; los números de víctimas de sequía son estimaciones aproximadas; no están considerados los decesos por epidemias.

Después de 1976, los desastres marcados con un asterisco (*) pueden ser clasificados como grandes desastres en términos de víctimas.

Cuadro 2. Grandes desastres naturales en el mundo en términos de pérdidas económicas (1976- 1998) en millones de dólares. (Pérdidas mayores de 1,000 millones de dólares.)



Año	Desastre	País	Económicas
1984/85*	Sequía/ Guerra	Etiopía, Sudán, Chad	1,000
1986	Sequía/ Onda de calor	Estados Unidos	1,500
1992*	Sequía/ Guerra	Somalia	1,000
1994	Sequía	China	2,000
1994	Sequía	Australia	1,000
1998	Sequía/ Incendios forestales	Estados Unidos	4,775

Fuente: Comité IDNDR alemán, la lista se basa en diferentes fuentes.

Después de 1976, los desastres marcados con un asterisco (*) pueden ser clasificados como grandes desastres en términos de daños (más de \$1,000 millones de dólares).

4.3. Sequías en México

México históricamente ha sido afectado por fenómenos meteorológicos que han ocurrido, tal y como sucede a nivel global. La sequía se presenta en las diversas regiones del país con diferente magnitud e impacto, siendo en general el norte del país la región con una alta vulnerabilidad, ya que se ubica en la franja de los grandes desiertos del mundo correspondientes al hemisferio norte, en donde las condiciones de aridez prevalecen debido a las reducidas cantidades de precipitación que se tienen en la región (CONAGUA, 2014).

La Comisión Nacional del Agua (2018) señala que durante los últimos 20 años las sequías en México han producido pérdidas económicas por miles de millones de dólares. Así mismo, en los años 2011 a 2013 el país se vio severamente afectado por una sequía que cubrió el 90% del territorio.

Es importante mencionar que, durante el año 2018, los estados de Sinaloa, Durango, Zacatecas, Nuevo León y Tamaulipas presentaron precipitaciones muy por debajo de lo normal equivalente a un 20% (promedio de precipitación nacional 104.6 mm), dando como resultado que se tuviera el mes más seco (julio) de acuerdo con los datos desde 1941 con solo 83.8 mm (CONAGUA, 2018b).

Esquivel (2002) destaca que la sequía se ha presentado en diversas regiones del país principalmente en los periodos: 1948-1954, 1960-1964 y 1993-1996 (Cuadro 3) con diversos efectos económicos y sociales.

Cuadro 3. Efectos de la sequía en México durante el periodo de 1949 - 2000.

Año	Área geográfica afectada	Efectos económicos y sociales
1949	Norte y centro del país	Escasez de agua en las presas, como en Necaxa, que tiene 17 millones de metros cúbicos en lugar de 170.
1950	Tamaulipas y Nuevo León	Las presas están secas, excepto la de "La Copa".
1951	Sonora, Chihuahua, N. L., Tamaulipas y Coahuila	La SRH dispuso utilizar las reservas de la presa "La Boquilla", para regar los campos de Chihuahua.
1953	Norte, Noreste	250 mil hectáreas sembradas de algodón se perdieron.
1960	Tamaulipas, Durango	Las siembras de maíz y algodón se perdieron; cientos de animales murieron por los incendios forestales.
1960	Norte y Centro	Aumento de precios de los artículos de primera Necesidad.
1962	Nacional	Las precipitaciones pluviales disminuyeron año con año.
1962	Durango, Coahuila, Nuevo L., Tamaulipas y Chihuahua	Disminuyen los mantos acuíferos.
1970	Nacional	Se busca dar empleo a los desempleados en las zonas de desastre.
1971	Durango	La población exige a la SRH la perforación de nuevos pozos.
1972	Nuevo León	Mueren cien niños por deshidratación a causa de las altas temperaturas y más de dos mil internados.
1974	Coahuila	El ganado perece y se estiman las pérdidas en 800 mil cabezas. Daños en las siembras de maíz y frijol.
1974	Coahuila	Las pérdidas de 30 millones de pesos.
1975	Nuevo León, Coahuila, Tamaulipas, Saltillo	Han muerto cerca de 780 mil reses. Las pérdidas ascienden a 100 millones de pesos.
1976	Durango	Mil millones de pesos se perdieron en el último ciclo agrícola debido a las sequías y heladas. Se dejaron de cosechar 180 mil toneladas de frijol y 75 mil de maíz.
1976	Durango, Coahuila	La Comarca Lagunera las presas tienen volúmenes bajísimos de agua.
1977	Nuevo León, Límites de Tamaulipas y Coahuila	70% de las cosechas perdidas. Se han dejado de sembrar cerca de 50 mil hectáreas.
1997	Puebla, Acatlán y Matamoros	Pérdidas por 20 millones de pesos en la agricultura. El 90% de los cultivos de maíz y frijol en la zona sur se perdieron.

Año	Área geográfica afectada	Efectos económicos y sociales
1977	Coahuila, márgenes del río Bravo	Fuertes pérdidas en la agricultura. Han muerto 24 niños por deshidratación. Hay incendios forestales.



1977	Puebla	43 mil hectáreas perdidas de cultivos de maíz, frijol y cebada.
1993	Zacatecas, Estado de México	Mueren más de 5 mil reses por la sequía en Zacatecas. Estado de México, la sequía provocó pérdida de mil hectáreas sembradas de maíz y además sin cultivar 5 mil hectáreas. Se han registrado 2,235 incendios forestales.
1994	Chihuahua	Fallecieron 54 personas por deshidratación.
1995	Norte y Centro del país	Piden declarar zonas de desastre por la sequía en cuatro estados (Durango, Tamaulipas, Hidalgo y Puebla).
1996	Coahuila	60 mil cabezas de ganado muertas en los últimos 6 meses debido a la sequía que afecta al estado.
1998	Chihuahua, Campeche Tabasco, Guanajuato y México,	Mueren 1 millón de cabezas de ganado y 40 mil hectáreas de cultivo siniestradas.
1998	Norte, Centro y Sur	Durango: mueren 22 personas por sed y hambre.
1998	Norte, Centro y Sur	Coahuila: 100 mil cabezas de ganado han muerto y el 50% de los cultivos se han perdido.
1998	Norte, Noroeste, Centro y la Península	10 mil cabezas de ganado murieron, 30 mil productores resultaron afectados, 700 mil hectáreas de cultivos de granos básicos y pastizales se siniestraron.
1998	Noreste del país	Durango: 80 mil familias han sido perjudicadas por la sequía, más de 8 mil cabezas de ganado han muerto.
1999	Durango	El 20% de las áreas frutícolas afectadas.
1999	Sureste y Norte de Zacatecas	182 mil ha de frijol y maíz destruidas, y 150 cabezas de ganado muertas. 28 municipios abandonados por la sequía.
2000	San Luis Potosí	Mueren 250 cabezas de ganado caballar y bovino.
2000	Coahuila	Migraron 2 millones de jornaleros.
2000	Sonora	Brote de hepatitis por sequía, se racionaliza el agua por escasez.

*Fuente: García J., F., Fuentes M., O. y Matías R., L. 2002. Serie Fascículo: Sequías. Centro Nacional de Prevención de Desastres. Secretaría de Gobernación. México. D.F. 39 p.

5. REVISIÓN DE LITERATURA

5.1. Ciclo hidrológico

El agua en la naturaleza no permanece estática, presenta un constante dinamismo en el cual se definen diferentes etapas o fases; éstas, por su manera de enlazarse, generan un verdadero ciclo, ya que su inicio ocurre donde posteriormente concluye (Maderey *et al.*, 2005).



El ciclo del agua o ciclo hidrológico, se define como el movimiento constante del agua en todo el planeta (Figura 1); es un proceso continuo de la circulación y transformación del agua en sus tres estados (sólido, líquido y gaseoso); fundamentalmente, este fenómeno se atribuye a dos causas: energía solar y gravedad.

Impulsada principalmente por el calentamiento solar, el agua se evapora de las superficies oceánicas y terrestres, es transportada por los vientos y se condensa para formar nubes y precipitaciones que caen a la tierra y los océanos. La precipitación que cae sobre la tierra puede almacenarse temporalmente como nieve o humedad del suelo, mientras que el exceso de lluvia se escurre y forma arroyos y ríos, que descargan el agua dulce en los océanos, completando así el ciclo global del agua (Trenberth *et al.*, 2007). Aparicio (1989) señala que el ciclo hidrológico no tiene ni principio ni fin; y su desarrollo puede comenzar en cualquier punto.

A continuación, de manera general se describe: comienza en los océanos con la evaporación del agua. El calor del sol aporta la energía necesaria para romper los enlaces que mantienen unidas las moléculas de agua. Este proceso de cambio de estado de fase líquida a gas (vapor de agua) se denomina evaporación. Cuando la humedad relativa del aire es del 100% (punto de saturación) comienza la condensación, proceso por el cual el vapor de agua del aire se transforma en agua líquida dando lugar a la formación de nubes. Estas nubes en determinadas condiciones de presión y temperatura originan precipitaciones. La precipitación también puede ocurrir en forma de nieve y acumularse en los glaciares. Su fusión, junto con el resto de precipitaciones da lugar al agua superficial y subterránea (De Miguel *at. el.*, 2009).



Figura 1. Ciclo hidrológico.

*Fuente: <https://www.usgs.gov/media/images/el-ciclo-del-agua-water-cycle-spanish>

5.2. Fases del ciclo hidrológico

Precipitación: Chávez (2007) establece que la cantidad de humedad atmosférica sobre una región es determinada por factores climáticos y geográficos; la localización de la región con respecto al sistema general de circulación, la latitud y la distancia a la fuente de humedad, son variables que tienen influencia en el clima, como las barreras orográficas a menudo ejercen una influencia mucho mayor en el clima de una región que la cercanía a la fuente de humedad. Es importante aclarar, que bajo el término de precipitación se engloban todas las aguas meteóricas que caen en la superficie de la tierra tanto en forma líquida como sólida, esto es; lluvia, granizo o nieve.

Evaporación: se produce básicamente por el aumento de energía cinética que experimentan las moléculas de agua cercanas a la superficie de un suelo húmedo



o una masa de agua, producido por la radiación solar, el viento y las diferencias en presión de vapor (Aparicio, 1989), básicamente es un aspecto físico, es el paso del estado líquido a gaseoso del agua.

Transpiración: La transpiración consiste en la vaporización del agua líquida contenida en los tejidos de la planta y su posterior remoción hacia la atmósfera. Los cultivos pierden agua predominantemente a través de las estomas. Estos son pequeñas aberturas en la hoja de la planta a través de las cuales atraviesan los gases y el vapor de agua de la planta hacia la atmósfera (Allen *et al.*, 2006).

Evapotranspiración: Se conoce como evapotranspiración (ET) la combinación de dos procesos separados por los que el agua se pierde a través de la superficie del suelo por evaporación y por otra parte mediante transpiración del cultivo (Allen *et al.*, 2006).

Infiltración: Consiste en el movimiento del agua, a través de la superficie del suelo y hacia adentro del mismo, producido por la acción de las fuerzas gravitacionales y capilares (Aparicio, 1989., Maderey *et al.*, 2005).

Escurrimiento: se define como el agua proveniente de la precipitación que circula sobre o bajo la superficie terrestre y que llega a una corriente para finalmente ser drenada hasta la salida de la cuenca. El agua proveniente de la precipitación que llega hasta la superficie terrestre -una vez que una parte ha sido interceptada y evaporada- sigue diversos caminos hasta llegar a la salida de la cuenca. Conviene dividir estos caminos en tres clases: escurrimiento superficial, escurrimiento subsuperficial y escurrimiento subterráneo (Aparicio, 1989).

5.3. Definición de clima

Para el concepto de clima se presentan algunas definiciones dadas por varios autores:

- El clima se suele definir en sentido restringido como el estado promedio del tiempo y, más rigurosamente, como una descripción estadística del tiempo



atmosférico en términos de los valores medios y de la variabilidad de las magnitudes correspondientes durante períodos que pueden abarcar desde meses hasta millares o millones de años (IPCC (2013)).

- El Servicio Meteorológico Nacional presenta dos definiciones: 1) estado más frecuente de la atmósfera en un lugar determinado, comprende los extremos y todas las variaciones, analizados en un periodo largo de tiempo. Está determinado por elementos y factores; 2) Conjunto fluctuante de las condiciones atmosféricas, caracterizado por los estados y evoluciones del tiempo de un dominio espacial determinado.
- Por su parte, el Instituto Nacional de Ecología y Cambio Climático (2018) indica que el clima es el estado más frecuente de la atmósfera de un lugar de la superficie terrestre; es decir, una descripción estadística de las condiciones meteorológicas más frecuentes de una región en cierto periodo de tiempo.
- El Instituto Interamericano de Cooperación para la Agricultura (2013) plantea que el clima es el conjunto de fenómenos meteorológicos, tales como las temperaturas medias, precipitaciones o vientos dominantes que caracterizan una región específica durante un período de muchos años, típicamente 30 años.
- Finalmente, Rodríguez *et. al.*, (2004), definen al clima como el conjunto de estados de tiempo atmosférico que se producen en una determinada región.

5.4. Cambio climático

IPCC (2013) define al cambio climático como una variación del estado del clima identificable (por ejemplo, mediante pruebas estadísticas) en las variaciones del valor medio y/o en la variabilidad de sus propiedades, que persiste durante largos períodos de tiempo, generalmente decenios o períodos más largos. El cambio climático puede deberse a procesos internos naturales o a forzamientos externos tales como modulaciones de los ciclos solares, erupciones volcánicas o cambios antropogénicos persistentes de la composición de la atmósfera o del uso del suelo.



Martínez y Patiño (2012) mencionan que, en México, varias de sus principales cuencas hidrológicas ya registran condiciones de escasez de acuerdo a estándares internacionales. En el 2005 una amplia región del centro y norte del país presentaba condiciones de disponibilidad muy baja, y en la cuenca del valle de México, extremadamente baja. Se estima que para el año 2030 varias regiones hidrológicas de importancia y gran extensión se encuentren en condiciones de disponibilidad extremadamente baja, entre ellas la cuenca binacional del río Bravo. Para México los pronósticos de temperatura para diferentes escenarios indican que la temperatura media podría incrementarse 4 °C en promedio al final del presente siglo, respecto del promedio del periodo 1961-1990, y en algunas regiones del norte y noroeste, más de 5 °C.

5.5. Efecto invernadero

El análisis del cambio climático debe considerar, los causantes de este cambio, los Gases Efecto Invernadero (GEI), son los responsables de acontecimientos que van desde la emisión de los mismos, aumento de concentración en la atmósfera y forzamiento radiativo, sus consecuencias climáticas manifestada en cambios en los distintos ecosistemas naturales, así como en la propia salud del hombre. La sensibilidad climática y las retroalimentaciones del clima pueden potenciar o reducir el efecto de determinados agentes de forzamiento radiativo. A partir de estos datos y, de acuerdo con el modelo de tratamiento de las incertidumbres, se puede efectuar una atribución de las causas del cambio climático (Figura 2).

Al margen del efecto invernadero natural, al que nos hemos referido, es evidente que son las actividades humanas las principales responsables de aumento de la concentración de atmosférica de los GEI entre los que destacan el dióxido de carbono, vapor de agua, metano, óxidos de nitrógeno, y productos halocarbonados, que aportan flúor, cloro y bromo, además de muchos aerosoles (Useros, 2012).



Figura 2. Esquema del efecto invernadero.

*Fuente: <https://www.voanoticias.com/a/cambio-climatico-gases-efecto-invernadero-baten-recordf/3049879.html>

5.6. Fenómenos hidrometeorológicos

La Ley General de Protección Civil (2012), en su artículo 2, inciso XXIII define a un fenómeno hidrometeorológico como un agente perturbador que se genera por la acción de los agentes atmosféricos, tales como: ciclones tropicales, lluvias extremas, inundaciones pluviales, fluviales, costeras y lacustres; tormentas de nieve, granizo, polvo y electricidad; heladas; sequías; ondas cálidas y gélidas; y tornados.

5.7. Definición de sequía

García et al. (2002) mencionan que la sequía, como fenómeno natural asociado al ciclo hidrológico, ha sido poco estudiada y no precisamente por carecer de importancia, sino por lo complicado que resulta analizarla debido a los múltiples factores que son causa y efecto de la misma. De hecho, el reconocimiento de la sequía como fenómeno hidrológico extremo, dista mucho de tener las características de otros como son las grandes avenidas. Por ello, se ha llegado a



mencionar que la sequía es un «no evento», debido a que su ocurrencia, sobre todo en su inicio, no es fácilmente detectable como tal, sino que se le reconoce por los efectos que causa después de un cierto tiempo. Asimismo, Mishra y Singh (2010) señalan las diferencias en las variables hidrometeorológicas y los factores socioeconómicos, así como la naturaleza estocástica de las demandas de agua en diferentes regiones del mundo, que se han convertido en un obstáculo para tener una definición precisa de sequía. A continuación, se presentan algunas definiciones de sequía dadas por diferentes autores:

- IPCC (2013) lo define como un período de condiciones anormalmente secas durante suficiente tiempo para causar un desequilibrio hidrológico grave;
- Por su parte, Morales *et. al.*, (2000) señalan que la sequía está basada en el establecimiento de umbrales adaptados a la realidad climática de cada área geográfica determinada y que se estiman a partir de la cantidad de lluvia que se acumula en un intervalo de un periodo de tiempo;
- La Organización Meteorológica Mundial (OMM) (2012) considera la sequía como la ausencia prolongada o escasez evidente de precipitación;
- Esquivel (2002) describe a la sequía como la disminución de la precipitación de una región respecto del valor normal en un periodo, lo que trae como consecuencia escasez de agua para los diferentes usos: de almacenamiento, agrícola, municipal, industrial, etc. y para el ambiente: ríos, aguas subterráneas y humedad del suelo;
- Desde el punto de vista de Ortega (2012) la sequía es considerada como un fenómeno climático recurrente caracterizado por una reducción en la precipitación pluvial, que provoca que el agua disponible sea insuficiente para satisfacer las distintas necesidades humanas y de los ecosistemas, durante un tiempo y en una zona determinados;
- Wilhite (2000) la refiere como la consecuencia de una reducción natural en la cantidad de precipitación. Se produce durante un período prolongado de tiempo, generalmente una temporada o más, aunque otros factores climáticos (como altas temperaturas, vientos fuertes y baja humedad relativa)



a menudo se asocian con él en muchas regiones del mundo y pueden agravar significativamente la severidad del evento.

- Bathke *et. al.*, (2019) expresan en términos generales que la sequía es el resultado de una falta de precipitación o cambios en el tiempo, la frecuencia o el tipo de precipitación.

En general, todas las definiciones establecen claramente que la sequía se debe principalmente a el colapso del régimen de lluvias, que causa una serie de consecuencias, incluidas las agrícolas y las hidrológicas (Paulo *et. al.*, 2006).

5.8. Clasificación de las sequías

La sequía se produce en zonas de alta y baja precipitación. Es una condición relativa a alguna condición promedio a largo plazo de equilibrio entre lluvia y evapotranspiración en un área particular, una condición a menudo percibida como "normal". Sin embargo, la lluvia promedio no proporciona una medida estadística adecuada de las características de lluvia en una región dada, especialmente en las áreas más secas.

La severidad de la sequía también es difícil de determinar. No solo depende de la duración, intensidad y extensión geográfica de un episodio de sequía en específico, sino también en las demandas hechas por las actividades humanas y por la vegetación en los suministros de agua de una región. Las características de la sequía, junto con sus impactos de largo alcance, hacen que sus efectos sobre la sociedad, la economía y el medio ambiente sean difíciles, aunque no imposibles, de identificar y cuantificar.

La importancia de la sequía no debe separarse de su contexto social. Si bien una sequía puede tener lugar en una temporada o en una serie de años, sus impactos en la sociedad pueden persistir durante muchos años. Además, el impacto de una sequía depende en gran medida de la vulnerabilidad de la sociedad a la sequía en ese momento en particular. Las sequías posteriores en la misma región probablemente tendrán diferentes efectos, incluso si son idénticos en intensidad, duración y características espaciales (Wilhite y Glantz, 1985).



Wilhite y Glantz (1985) plantean una clasificación de sequía que la agrupan en cuatro tipos (Figura 3):

- La sequía meteorológica se define principalmente por una deficiencia de precipitación respecto de lo esperado o "normal" durante un período prolongado de tiempo. Ravelo *et. al.*, (2014) destacan que la intensificación y prolongación en el tiempo de esta clase conduce a la aparición de los otros tipos de sequía.
- La sequía hidrológica se define por deficiencias en el suministro de agua superficial y subterránea (es decir, niveles de reservorios y aguas subterráneas, flujo de corriente y manto de nieve). Estos tipos de sequía (meteorológica e hidrológica) pueden coexistir o pueden ocurrir por separado.
- La sequía agrícola, por lo general, se refiere a un período con disminución de la humedad del suelo y consecuente fracaso de los cultivos sin ninguna referencia a los recursos hídricos superficiales. Una disminución de la humedad del suelo depende de varios factores que afectan las sequías meteorológicas e hidrológicas junto con las diferencias entre la evapotranspiración real y la evapotranspiración potencial. La demanda de agua de la planta depende de las condiciones climáticas prevalecientes, las características biológicas de la planta específica y la etapa de crecimiento, y las propiedades físicas y biológicas del suelo. Para estudiar las sequías agrícolas, se han desarrollado índices basados en una combinación de precipitación, temperatura y humedad del suelo.
- La sequía socioeconómica se asocia con la falta de los sistemas de recursos hídricos para satisfacer las demandas de agua y, por lo tanto, asocia las sequías con la oferta y la demanda de un bien económico (agua). La sequía socioeconómica ocurre cuando la demanda de un bien económico excede la oferta como resultado de un déficit de suministro de agua relacionado con el clima (Mishra y Singh, 2010).

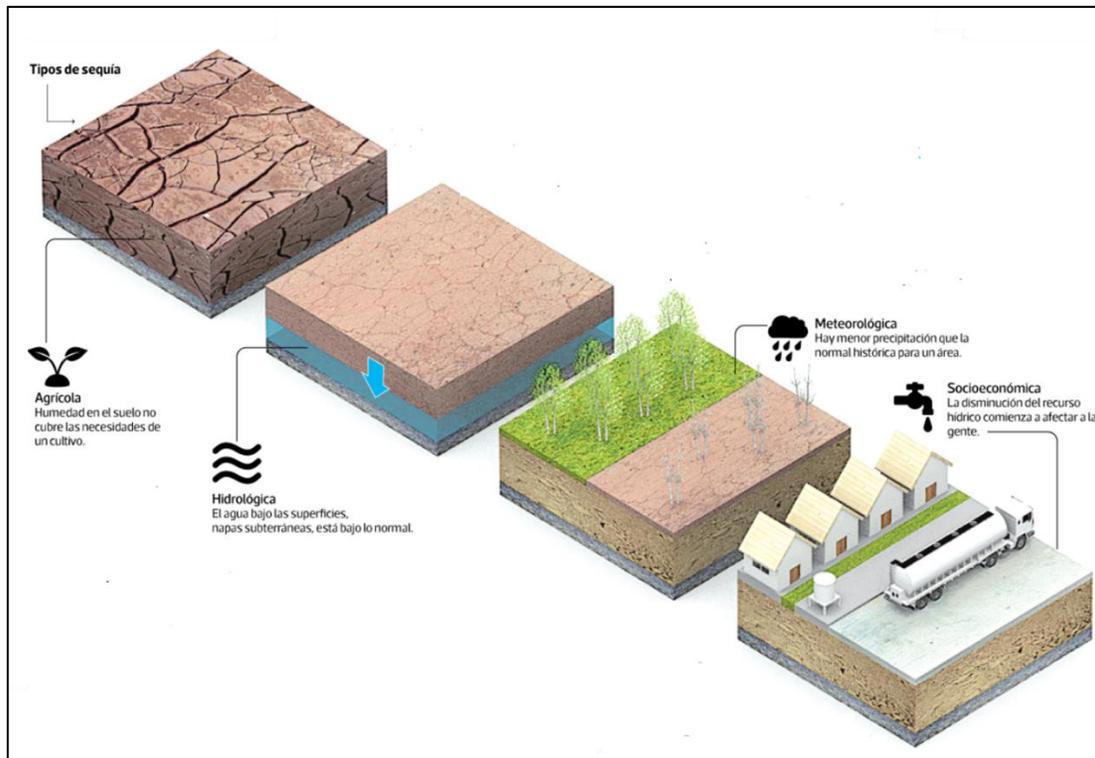


Figura 3. Esquema de tipos de sequía.

*Fuente: <https://www.unccd.int/sites/default/files/relevant-links/2017-09/Jose%20Miguel%20Torrico%20Conf.%20Bolivia.pdf>

5.9. Características de la sequía

Según Wilhite (2011) hay tres elementos esenciales que distinguen las sequías entre sí: intensidad, duración y extensión espacial.

La intensidad se refiere al grado de déficit de precipitación y la gravedad de los impactos asociados con el déficit. Generalmente se mide por la salida de algún indicador o índice climático de lo normal y está estrechamente relacionado con la duración en la determinación del impacto.

La duración en las sequías generalmente requiere un mínimo de dos o tres meses para establecerse, pero luego pueden continuar durante meses o años. Es bastante común que las regiones de tierras secas sufran años de sequía consecutivos, pero esto también puede ocurrir en climas más húmedos. La magnitud del impacto de la sequía está estrechamente relacionada con el momento del inicio de la escasez de



precipitaciones, su intensidad y la duración del evento. A medida que las sequías se extienden de una estación a otra y de un año a otro, los posibles impactos se magnifican ya que los suministros de agua superficial y subterránea continúan agotándose y un mayor número de usuarios se ven afectados.

Las sequías también difieren en términos de sus características espaciales. Las sequías son de naturaleza regional y pueden afectar millones de kilómetros cuadrados. Debido a la larga duración de la sequía, su epicentro cambia de una estación a otra y de un año a otro. Los sistemas de monitoreo de sequías deben confiar en múltiples indicadores para identificar adecuadamente las áreas de máxima severidad y poder evaluar cómo los cambios en la dimensión espacial de la sequía alteran los impactos actuales y futuros; la activación y finalización de las acciones de mitigación y los programas de emergencia.

5.10. Vulnerabilidad a la sequía

Desde el punto de vista de Valiente (2001) el componente vulnerabilidad determina el grado de sensibilidad de un espacio geográfico, la población que lo habita, las actividades económicas que se desarrollan, y el tejido social que lo caracteriza, a la escasez de precipitaciones. Son vulnerables los grupos de humanos, actividades o territorios que afrontan el riesgo de efectos negativos extremos como resultado de eventos climáticos que sobrepasan las adaptaciones en curso, de tal forma que la vulnerabilidad se encuentra estrechamente relacionada con el aspecto social y lo económico, así mismos estos aspectos se encuentran sometidos a variaciones y cambios que desarrollen el tejido social y la estructura económica.

Para comprender el análisis del impacto de los fenómenos naturales, Escalante (2003) considera importante tener en cuenta los siguientes conceptos:

- a) **Riesgo:** Es la probabilidad de tener una consecuencia dañina o pérdida esperada (vidas, propiedades, actividad económica o daño ambiental), que resulta de las interacciones entre los peligros naturales o los inducidos por las actividades humanas y de las condiciones de vulnerabilidad y capacidad de respuesta. Convencionalmente, el riesgo se expresa por la ecuación:



Riesgo = peligro * vulnerabilidad / capacidad

- b) **Análisis de riesgo:** Es el proceso que determina la naturaleza y extensión del riesgo a través del análisis y evaluación técnica de los peligros (ubicación, intensidad y probabilidad) y de las condiciones existentes de vulnerabilidad/capacidad que poseería una amenaza potencial para dañar a la gente, sus propiedades y al ambiente.
- c) **Peligro:** Se define así a cierta actividad humana o evento físico que representa una amenaza futura, capaz de causar pérdidas de vidas, daños materiales, desequilibrios económicos y sociales y degradación ambiental. Cada peligro se caracteriza por su ubicación, intensidad, frecuencia y probabilidad.
- d) **Vulnerabilidad:** es el conjunto de condiciones y procesos que resultan de factores físicos (ubicación), sociales (ligados al nivel de bienestar y marginación de la población), económicos (reservas monetarias, deuda pública, acceso al crédito y a los seguros) y ecológicos (degradación de los recursos naturales, pérdida de la biodiversidad), los cuales incrementan la susceptibilidad de una comunidad al impacto de un peligro. La Comisión Nacional del Agua (2015) presenta tres definiciones de vulnerabilidad ante la sequía:
- **Vulnerabilidad económica:** se formula a partir de la relación indirecta entre los niveles de ingreso y el impacto de fenómenos físicos extremos, caso de la sequía, provocando el aumento en el riesgo de padecer el desastre debido a la falta de financiamiento a la producción, insuficiencia de ingresos, inestabilidad laboral y dificultad a los accesos de los servicios formales de salud, educación y recreación, entre otros.
 - **Vulnerabilidad social:** surge este tipo de vulnerabilidad y se fortalece ante la existencia de una deficiente organización y unión interna de la sociedad bajo riesgo, con el aumento del empobrecimiento, el desempleo y/o subempleo; limitando la capacidad de prevenir, mitigar



y dar respuesta oportuna ante una situación del desastre por déficit hídrico.

- **Vulnerabilidad ambiental:** está relacionada con la susceptibilidad intrínseca del medio o los recursos naturales a sufrir daños por la falta de agua; esto es debido a que los seres humanos necesitan de ciertas condiciones ambientales para desarrollarse y donde en caso de tener en la naturaleza un dominio por la vía de la destrucción de las reservas del ambiente, los ecosistemas resultan altamente vulnerables.

5.11. Índices de sequía

Para reducir el daño causado por la sequía, es crucial caracterizar las sequías. La caracterización de la sequía permite operaciones como la alerta temprana de sequía y el análisis del riesgo de sequía, que permiten una mejor preparación y planificación de contingencias (Zargar *et. al.*, 2011).

Para tener un panorama más claro, es importante definir que son los indicadores e índices de sequía. La Organización Meteorológica Mundial y Asociación Mundial para el Agua (2016) plantea lo siguiente:

- **Indicadores:** son variables o parámetros utilizados para describir las condiciones de las sequías. 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.
- **Índices:** son 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. Porque vigilan el clima en diversas escalas temporales que permite reconocer los períodos húmedos de corta duración dentro de las



sequías de larga duración o los períodos secos de corta duración dentro de los períodos húmedos de larga duración.

Asimismo, existen varios autores que definen los índices de sequía; tal como lo señalan Zargar *et. al.*, (2011), que los define como medidas cuantitativas que caracterizan los niveles de sequía, al asimilar datos de una o varias variables (indicadores) como la precipitación y la evapotranspiración en un solo valor numérico. Por su parte, Steinemann (2003) y Steinemann *et al.*, (2015) mencionan que los indicadores de sequía pueden ayudar a detectar, evaluar y reducir los impactos de la sequía. Sin embargo, algunos indicadores a menudo presentan deficiencias que limitan su efectividad, como inconsistencia estadística, no compatibilidad y falta de contexto histórico. También plantean que los indicadores se basan en variables meteorológicas e hidrológicas como la precipitación, el flujo de la corriente, la humedad del suelo, depósito de almacenamiento y niveles de agua subterránea. Finalmente, Mishra y Singh, (2010) consideran un índice de sequía como una variable que evalúa el efecto de una sequía y lo define con diferentes parámetros: intensidad, duración, gravedad y extensión espacial. Asimismo, es importante tomar en cuenta una variable de sequía debería ser capaz de cuantificar la sequía para diferentes escalas de tiempo para las cuales una serie de tiempo larga es esencial.

La Organización Meteorológica Mundial (OMM) y Asociación Mundial para el Agua (2016) presenta un listado de los 50 indicadores más utilizados (Cuadro 4), se agruparon en 5 categorías: meteorología, humedad del suelo, hidrología, teledetección y mixto o modelado.

Cuadro 4. Indicadores de sequía.

Indicador	Origen
Meteorología	
Índice de anomalía de aridez (AAI)	Departamento de Meteorología de India, India.
Deciles	Gibbs y Maher con la Oficina de Meteorología de Australia.



Indicador	Origen
Meteorología	
Índice de sequía de Keetch-Byram (KBDI)	Servicio Forestal del Departamento de Agricultura, Estados Unidos.
Porcentaje de precipitación habitual	Se desconoce su origen exacto.
Índice normalizado de precipitación (SPI)	Universidad del Estado de Colorado por McKee y otros. Estados Unidos
Anomalía ponderada y normalizada de la precipitación (WASP)	Lyon, Francia.
Índice de aridez (AI)	Trabajo realizado por De Martonne en 1925.
Índice Z de China (CZI)	China.
Índice de humedad de los cultivos (CMI)	Trabajo original realizado por Palmer.
Índice de zonas de sequía (DAI)	Instituto Indio de Meteorología Tropical por Bhalme y Mooley
Índice de reconocimiento de sequías (DRI)	Universidad Técnica Nacional de Atenas, por Tsakiris y Vangelis, Grecia.
Índice de sequía efectiva (EDI)	Creado por Byun y Wilhite, junto con el personal del NDMC.
Coefficiente hidrotérmico de Selyaninov (HTC)	Creado por Selyaninov en la Federación de Rusia y basado en el clima ruso.
Índice de sequía de la NOAA (NDI)	Departamento de Agricultura de Estados Unidos.
Índice de severidad de sequía de Palmer (PDSI)	Estados Unidos.
Índice Z de Palmer	Estados Unidos.
Índice de anomalía pluviométrica (RAI)	Van Rooy 1960.
Índice auto-calibrado de severidad de sequía de Palmer (sc-PDSI)	Universidad de Nebraska-Lincoln, Wells y otros. Estados Unidos.
Índice normalizado de anomalías (SAI)	Katz y Glantz con el Centro Nacional de Investigaciones Atmosféricas, Estados Unidos.
Índice estandarizado de precipitación y evapotranspiración (SPEI)	Instituto Pirenaico de Ecología, en Zaragoza (España) por Vicente-Serrano y otros.
Índice de sequía de referencia para la agricultura (ARID)	Universidad del Estado de Mississippi y Universidad de Florida, Estados Unidos
Índice de sequía específico para cultivos (CSDI)	Creado por Meyer y otros, Universidad de Nebraska- Lincoln, Estados Unidos.
Índice para reclamaciones por sequía (RDI)	La Oficina de Reclamaciones de Estados Unidos.
Humedad del suelo	
Anomalía de la humedad del suelo (SMA)	Creado por Bergman y otros en el Servicio Meteorológico Nacional de Estados Unidos.
Índice del déficit de evapotranspiración (ETDI)	Creado por Narasimhan y Srinivasan en la Estación Agrícola Experimental de Texas, Estados Unidos.
Índice del déficit de humedad del suelo (SMDI)	Creado por Narasimhan y Srinivasan en la Estación Agrícola Experimental de Texas, Estados Unidos.
Almacenamiento de agua del suelo (SWS)	Desconocido.
Hidrología	
Índice de sequía hidrológica de Palmer (PHDI)	Estados Unidos.
Índice normalizado del suministro de embalses (SRSI)	Creado por Gusyev y otros en Japón.
Índice normalizado de los caudales fluviales (SSFI)	Modarres presentó el SSFI en 2007, y Telesca y otros profundizaron en su estudio en 2012.
Índice normalizado del nivel del agua (SWI)	Creado por Bhuiyan en el Instituto de Tecnología de India, India.



Indicador	Origen
Meteorología	
Índice de sequía de los caudales fluviales (SDI)	Creado por Nalbantis y Tsakiris.
Índice del abastecimiento de las aguas superficiales (SWSI)	Creado por Shafer y Dezman.
Índice agregado de sequía (ADI)	Keyantash en la Universidad del Estado de California y por Dracup en la Universidad de California-Berkeley, Estados Unidos.
Índice normalizado de la fusión de la nieve y la lluvia (SMRI)	Staudinger y otros llevaron a cabo los estudios; el índice se sometió a pruebas en distintas cuencas de Suiza.
Teledetección	
Índice mejorado de la vegetación (EVI)	Creado por Huete y un equipo de Brasil y la Universidad de Arizona, Estados Unidos.
Índice de estrés por evaporación (ESI)	Departamento de Agricultura, la Universidad de Alabama-Huntsville y Universidad de Nebraska-Lincoln, Estados Unidos,
Índice diferencial normalizado de vegetación (NDVI)	Océano y de la Atmósfera (NOAA), Estados Unidos.
Índice de las condiciones de temperatura (TCI)	Creado por Kogan con la (NOAA), Estados Unidos.
Índice de condiciones de la vegetación (VCI)	Creado por Kogan con la (NOAA), Estados Unidos.
Índice de respuesta a la sequía de la vegetación (VegDRI)	Centro para la Observación y Ciencia de los Recursos Terrestres del Servicio Geológico y el Centro sobre el Terreno de Estudios Geológicos de Flagstaff, Estados Unidos.
Índice de salud de la vegetación (VHI)	Creado por Kogan con la (NOAA), Estados Unidos.
Índice de satisfacción de la demanda de agua (WRSI) y WRSI geoespacial	Creado por la Organización de las Naciones Unidas para la Alimentación y la Agricultura.
Índice diferencial de agua normalizado (NDWI) e Índice de agua en la superficie terrestre (LSWI)	Centro Espacial Goddard de la Administración Nacional de Aeronáutica y del Espacio (NASA), Estados Unidos.
Índice de vegetación ajustado al suelo (SAVI)	Creado por Huete en la Universidad de Arizona, Estados Unidos.
Mixtos o modelados	
Indicador combinado de sequía (CDI)	Creado por Sepulcre-Canto y otros en el Observatorio Europeo de la Sequía.
Sistema mundial integrado de vigilancia y predicción de sequías (GIDMaPS)	Creado por Hao y otros en la Universidad de California en Irvine, Estados Unidos.
Sistema mundial de asimilación de datos de la superficie terrestre (GLDAS)	NASA y NOAA, Estados Unidos.
Índice estandarizado de sequía de múltiples variables (MSDI)	Creado por Hao y AghaKouchak en la Universidad de California en Irvine Estados Unidos.
Vigilancia de la sequía en Estados Unidos (USDm)	Creado por Svoboda y otros en Estados Unidos.

5.12. Índice de sequía de Palmer



El índice de severidad de la sequía de Palmer (PDSI, por sus siglas en inglés) fue desarrollado como una herramienta climatológica en la evaluación a largo plazo de la sequía meteorológica, para demostrar el éxito en la cuantificación de la gravedad de las sequías en diferentes climas. El objetivo de Palmer (1965) era desarrollar una metodología general para evaluar la sequía en términos de un índice que permita comparaciones de la severidad de la sequía en tiempo y espacio.

Este índice fue uno de los primeros y más utilizados, se basa en un balance simplificado suelo-agua. Si bien el PDSI se estableció para explicar adecuadamente muchos ciclos climáticos húmedos y secos observados, tiene algunas limitaciones debido a las muchas parametrizaciones del cálculo y la falta de capacidad para detectar la sequía en una amplia gama de escalas de tiempo (McEvoy *et. al.*, 2012).

Este índice se calcula utilizando datos de temperatura y precipitación. Es por ello que a partir de éste se han planteado derivados, así como algunas modificaciones. Igualmente, el índice Hidrológico de Sequía de Palmer (PHDI), cuantifica el impacto a largo plazo de las sequias con aplicaciones hidrológicas. Finalmente, el índice Z, que resulta mucho más sensible que el PDSI a las deficiencias de humedad a corto plazo. Uno de los principales problemas de los índices de Palmer es que los parámetros necesarios para su cálculo se obtuvieron empíricamente en zonas de los Estados Unidos, lo que limita el uso para otras regiones (Vicente *et. al.*, 2012).

5.13. Índice Estandarizado de Precipitación (SPI)

El Índice Estandarizado de Precipitación (SPI) fue propuesto por Mckee *et. al.*, (1993) de la Universidad Estatal de Colorado y se basa en la precipitación estandarizada, donde la estandarización se fundamenta en la probabilidad (Guttman,1998), que consiste simplemente en la diferencia de precipitación de la media durante un período de tiempo específico dividido por la desviación estándar, la media y la desviación estándar se determinan a partir de registros pasados.

El cálculo resultante de la precipitación estandarizada es linealmente proporcional al déficit de precipitación y permite especificar la probabilidad, el porcentaje o promedio y el déficit de precipitación acumulada. El enfoque básico es utilizar la



precipitación estandarizada para un conjunto de escalas de tiempo que en conjunto representan fuentes de agua en varios tipos.

El Índice Estandarizado de Precipitación (SPI) se calcula en la siguiente secuencia. Un conjunto de datos de precipitación mensual se prepara para un periodo de m meses, idealmente un periodo continuo de por lo menos 30 años. Se selecciona un conjunto de periodos de promedios para determinar una escala determinada de tiempo establecida para el periodo de i meses donde i es 3, 6, 12, 18 o 48 meses. El conjunto de datos se mueve en el sentido de que cada mes se determina un nuevo valor a partir de los i meses anteriores. Cada uno de los conjuntos de datos se ajusta a la función Gamma para definir la relación de probabilidad con la precipitación.

Una vez establecida la relación de probabilidad a la precipitación a partir de los registros históricos, se calcula la probabilidad de cualquier punto de datos de precipitación observada y se utiliza junto con una estimación de la normalidad inversa para calcular la desviación de la precipitación para una densidad de probabilidad distribuida normalmente con una media de cero y una desviación estándar de unidad (Mckee *et. al.*, 1993). En el Cuadro 5 se muestra la intensidad de la sequía utilizando el SPI como indicador donde se define con los siguientes valores:

Valores SPI	Categoría de sequía
2.0 y más	Extremadamente húmedo
1.5 a 1.99	Muy húmedo
1.0 a 1.49	Moderadamente húmedo
-0.99 a 0.99	Normal



**Cuadro
Valores
Índice**

-1.0 a -1.49	Moderadamente seco
-1.5 a -1.99	Severamente seco
-2 y menos	Extremadamente seco

**5.
del**

Estandarizado de Precipitación (SPI).

Fuente: Mckee T. B., Doesken N. J. y Kleist. 1993. The relationship of drought frequency and duration to time scales. En: 8th Conference on Applied Climatology. Anaheim, California.

Mckee *et. al.*, (1993) destaca las siguientes ventajas de utilizar el SPI:

- El SPI está relacionado de manera única con la probabilidad.
- La precipitación usada en el SPI puede ser usada para calcular el déficit de precipitación para el periodo actual.
- La precipitación usada en el SPI puede ser usada para calcular el porcentaje actual de la precipitación promedio para el periodo de tiempo de *i* meses.
- El SPI se distribuye normalmente de manera que puede ser utilizado para monitorear tanto los periodos húmedos como los secos.
- El SPI puede ser calculado para las otras variables de agua del manto nivoso, el reservorio, el flujo de los arroyos, la humedad del suelo y el agua subterránea.
- El SPI se normaliza para que los climas más húmedos y secos se representen de manera similar.

De acuerdo con Serrano *et. al.* (2016), uno de los inconvenientes que presenta el SPI es que su cálculo se fundamenta únicamente en los datos de precipitación y no considera otras variables como por ejemplo la temperatura la demanda de agua por



la atmosfera. Por otra parte, Wang *et. al.* (2019) menciona que el SPI es utilizado ampliamente para comparar condiciones secas y húmedas en diferentes áreas, pero su uso principales áreas con grandes impactos de precipitación.

5.14. Índice de Precipitación Evapotranspiración Estandarizada (SPEI)

Vicente *et. al.*, (2010) plantean un nuevo índice de sequía climática: el índice de precipitación evapotranspiración estandarizada (SPEI), el cual se basa en datos de precipitación y temperatura, y tiene la ventaja de combinar el carácter multiescalar con la capacidad de incluir los efectos de la variabilidad de la temperatura en la evaluación de la sequía. El SPEI es similar al índice de precipitación estandarizado (SPI), solo que éste incluye la variable temperatura. Los valores del SPEI que utiliza para establecer los periodos secos son los mismos que el SPI (Cuadro 5) (Peña *et. al.*, 2016).

El cálculo se basa en el procedimiento del SPI original. Para calcular el SPI se utiliza los datos de precipitación mensual o semanal como datos de entrada; en cambio, el SPEI utiliza la diferencia mensual o semanal entre la precipitación y la evapotranspiración potencial como datos iniciales lo que representa un balance hídrico climático simple (Thornthwaite, 1948), que se ajusta utilizando una distribución log-logística de tres parámetros. Los valores se acumulan en diferentes escalas de tiempo, siguiendo el mismo enfoque utilizado en el SPI, y se convierten en desviaciones estándar con respecto a los valores promedio (Vicente *et. al.*, 2012b).

Desde el punto de vista de Dai (2011) el SPEI se basa en la evapotranspiración potencial (PET) y no en la evapotranspiración real (E). La razón es que es la E y no PET lo que determina el equilibrio del agua superficial y las condiciones de sequía. Argumentó que debido a que PET y E a menudo se desacoplan en muchas áreas de tierra limitadas por agua, donde los estudios de sequía son más relevantes, es necesario un modelo físico para calcular la condición de humedad cerca de la superficie, a partir de la cual un índice de sequía debe derivarse.



Para estimar indirectamente el PET se han propuestos diferentes métodos a partir de parámetros meteorológicos medidos en estaciones meteorológicas. Según la disponibilidad de datos, dichos métodos incluyen métodos basados físicamente y modelos basados en relaciones empíricas, donde el PET se calcula con menos requisitos de datos. El método Penman-Monteith (PM) ha sido adoptado por la Comisión Internacional de Riego y Drenaje (ICID), la Organización de las Naciones Unidas para la Agricultura y la Alimentación (FAO) y la Sociedad Estadounidense de Ingenieros Civiles (ASCE) como el procedimiento estándar para calcular el PET. El método PM requiere grandes cantidades de datos porque su cálculo involucra valores de radiación solar, temperatura, velocidad del viento y humedad relativa. Los métodos en general proporcionan mejores resultados que otros para la cuantificación de PET, el propósito de incluir PET en el cálculo del índice de sequía es obtener una estimación temporal relativa, y por lo tanto el método utilizado para calcular el PET no es crítico (Vicente *et. al.*, 2010).

6. MATERIALES Y MÉTODOS

En este apartado se describe la metodología y los recursos necesarios para el análisis del periodo de sequía de 1964-2016 en la cuenca del río Nazas mediante los indicadores de sequía: Índice de Precipitación Estandarizada (SPI) e Índice Estandarizado de Precipitación-Evapotranspiración (SPEI).

6.1. Materiales

Los recursos que se necesitaron para la elaboración de este trabajo fueron, principalmente, investigaciones sobre sequía: libros, artículos científicos y bases de datos con información de las estaciones meteorológicas ubicadas en la zona de estudio.

6.1.1. Información meteorológica



La información climática se obtuvo de la Comisión Nacional del Agua (CONAGUA), se seleccionaron 61 estaciones meteorológicas ubicadas en la cuenca del río Nazas y se utilizaron los datos de las variables de precipitación mensual, así como de la temperatura máxima y mínima mensual.

6.1.2. Cartografía digital

La caracterización del área de estudio se realizó mediante cartografía digital disponible del Instituto Nacional de Estadística y Geografía (INEGI) y de la Comisión Nacional para el Conocimiento y Uso de la Biodiversidad (CONABIO).

6.1.3. Equipo de cómputo

La información fue procesada en una computadora personal DELL con las siguientes características técnicas: procesador intel Core i7 8th Gen, con memoria instalada (RAM) 8,00 GB, sistema operativo de 64 bits.

6.1.4. Software

Se utilizaron las siguientes plataformas:

1. Sistema de Información Geografía (SIG): Arc-Gis 10.5. para la delimitación y caracterización de la cuenca.
2. *Software* R (The R Project for Statistical Computing) para el análisis y cálculo de los índices de sequía. *Software* SigmaPlot 11.0 para el diseño y edición de gráficos.
3. Programas de *Office Microsoft Word* y Excel para la elaboración del documento.

6.2. Métodos

En la Figura 4 se presenta un diagrama general de la metodología que se siguió en el presente trabajo, teniendo como etapas principales: 1) elaboración del mapa base



de la zona de estudio, 2) análisis de la información meteorológica (precipitación y temperatura), 3) cálculo de índices de sequía, y 4) elaboración de propuestas de solución ante la presencia de sequías en la zona de estudio.

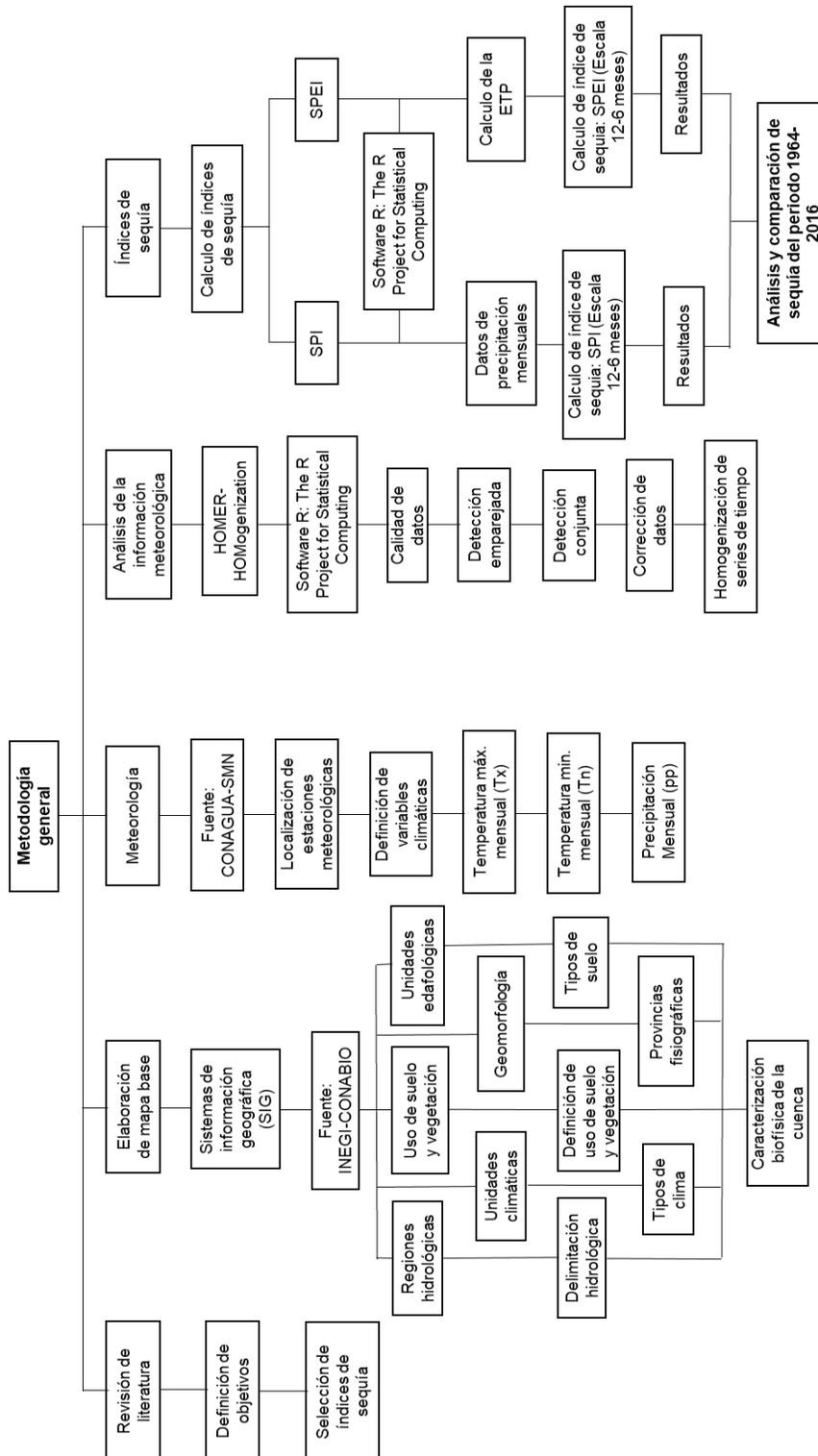


Figura 4. Diagrama de la metodología general.

6.2.1. Etapa 1: elaboración de mapa base

6.2.1.1. Área de estudio

La cuenca del río Nazas-Aguanaval se localiza entre los estados de Coahuila y Durango; este último ocupa el mayor espacio territorial (Figura 5). Pertenece a la Región Hidrológica 36 (RH36) de la Región Hidrológico - Administrativa Cuencas Centrales del Norte (VII) (CONAGUA, 2014). Se ubica entre las latitudes 22° 40' y 26° 35' Norte, y los Meridianos 101° 30' y 106° 20' Longitud Oeste.

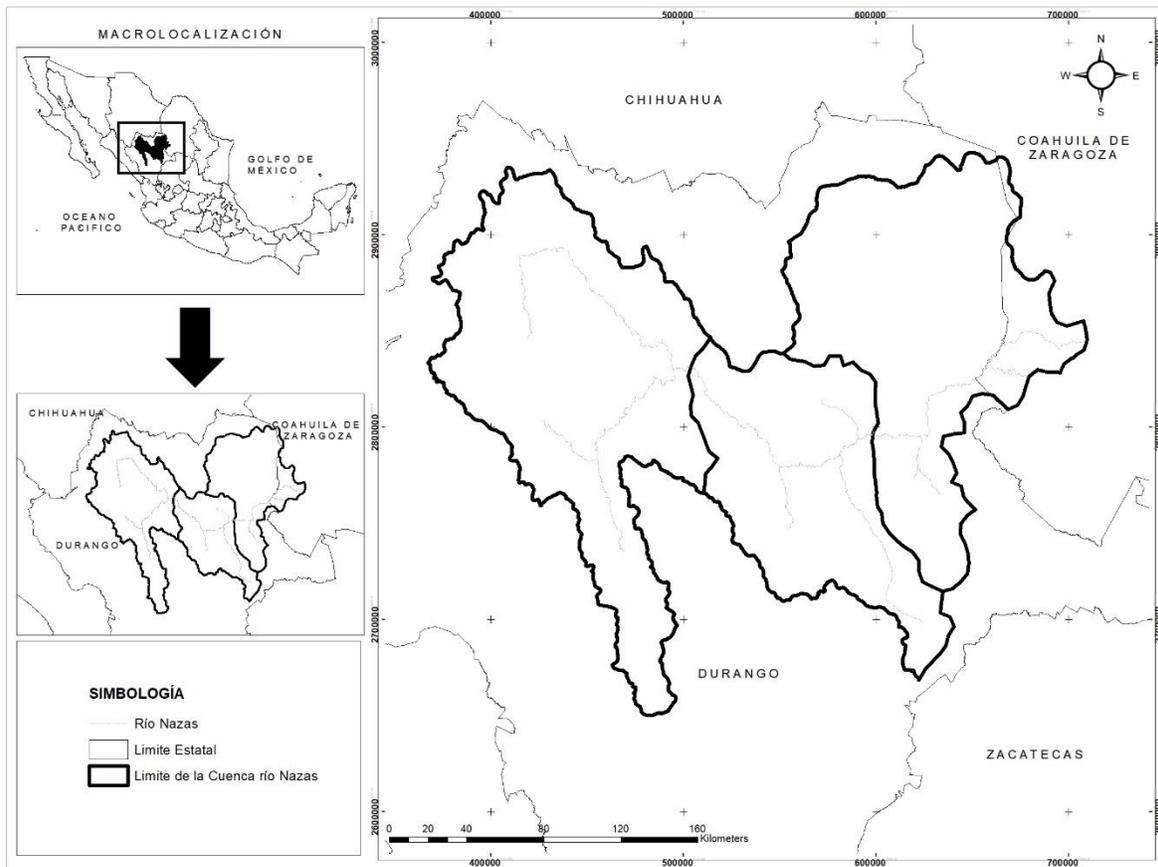


Figura 5. Ubicación de la cuenca del río Nazas (Elaboración propia).

6.2.1.2. Caracterización biofísica



La caracterización de la cuenca del río Nazas se realizó con un Sistema de Información Geográfica (SIG), a partir de información geoespacial oficial del Instituto Nacional de Estadística y Geografía (INEGI), Comisión Nacional para el Conocimiento y Uso de la Biodiversidad (CONABIO) y la Comisión Nacional del Agua (CONAGUA) en formato vectorial (*shape*).

6.2.1.3. Delimitación del área de estudio

Para fines de la investigación, se realizó una delimitación de la cuenca a partir del sistema de drenaje del río Nazas (CONAGUA, 2018). Esta delimitación permitió definir tres subcuencas (Cuadro 6).

Cuadro 6. Subcuencas del río Nazas.

Subcuenca	Subcuenca	Sup. (%)	Km ²
Subcuenca alta	Presa Lázaro Cárdenas	36.22	17663.54
Subcuenca media	Río Nazas-Rodeo	39.84	19427.93
Subcuenca baja	Río Nazas-Torreón	23.94	11670.39
Total		100	48761.87

6.2.1.4. Clima

De acuerdo con los datos sobre grupos climáticos de la Comisión Nacional para el Conocimiento y Uso de la Biodiversidad (CONABIO, 2001) los grupos climáticos con mayor presencia en la cuenca son de tipo **BS 1kw (w)** Semiseco templado y **BW hw (W)** muy seco semicálido. En el Cuadro 7 se describen brevemente todos los grupos climáticos presentes en la cuenca del río Nazas. (Anexo 1).

Cuadro 7. Características de los grupos climáticos presentes en la cuenca del río Nazas

Unidades climáticas		Sup. (km ²)	Sup. (%)	Descripción
Clave	Tipo de clima			
BW (h´) hw (w)	Muy seco cálido	77.06	0.16	Cálido, temperaturas medias, anual > 22 °C y del mes más frío < 18 °C, con Régimen de lluvia de verano
BW hw (w)	Muy seco semicálido	13867.31	28.44	Semicálido, temperaturas medias, anual 18° a 22 °C y del mes más frío < 18 °C, con régimen de lluvia de verano. El porcentaje de lluvia invernal corresponde a > 10.2 para lluvia de verano y < 36 para lluvia de invierno
BS 0 hw (w)	Seco semicálido	5100.92	10.46	Semicálido con invierno fresco, temperaturas medias, anual 18° a 22 °C y del mes más frío < 18 °C, con régimen de lluvia de verano.
BS 0 kw (w)	Seco templado	3690.82	7.57	Templado con verano cálido, temperaturas medias, anual 12° a 18 °C, del mes más frío entre - 3° y 18 °C y del mes más cálido >18 °C, con régimen de lluvia de verano.
C(E) (w2)	Semifrío subhúmedo	3959.44	8.12	Semifrío, temperatura media anual entre 5 ° y 12 ° C, con régimen de lluvia corresponde al de escasa todo el año.
BS 1hw (w)	Semiseco semicálido	309.58	0.63	Semicálido con invierno fresco, temperaturas medias, anual 18° a 22 °C y del mes más frío < 18 °C, con régimen de lluvia corresponde al de escasa todo el año.
BS 1kw (w)	Semiseco templado	16221.83	33.27	Templado con verano cálido, temperaturas medias, anual 12° a 18 °C, del mes más frío entre -3° y 18 °C y del mes más cálido >18 °C, con régimen de lluvia de verano.
C (w1)	Templado subhúmedo	5534.89	11.35	Templado, temperatura media anual entre 12° y 18 ° C. Subhúmedo con humedad media, cociente P/T entre 43.2 y 55.0.



Total	48,761.8 7	100	
--------------	-----------------------	------------	--

Fuente: García, 2004.

6.2.1.5. Geomorfología

a. Provincias fisiográficas

La cuenca del río Nazas comprende cuatro provincias fisiográficas: Sierras y Llanuras del Norte, Sierra Madre Occidental, Sierra Madre Oriental y Mesa del centro (CONABIO, 2008). Dicho lo anterior, el Instituto Nacional de Estadística y Geografía (INEGI, 2008) describe las provincias fisiográficas de la siguiente manera (Anexo 2):

Sierras y Llanuras del Norte: las sierras de esta provincia son muy bajas y muy inclinadas; se separan entre sí por grandes llanuras, algunas de ellas denominadas bolsones. El más conocido es el Bolsón de Mapimí, ubicado en los límites de Durango, Coahuila y Chihuahua. Al norte de esta provincia, cerca de Ciudad Juárez se encuentra las dunas de Samalayuca.

Sierra Madre Occidental: está formada en su mayor parte por rocas ígneas extrusivas. Originalmente era una gran meseta, pero millones de años de erosión crearon un paisaje con picos, mesetas, grandes cañones y barrancas. Se extiende cerca de la costa occidental de nuestro país, con una dirección Noreste-Sureste; se inicia 50 km, al sur del límite Internacional con los Estados Unidos para terminar en el río Santiago en Nayarit y el Eje Neovolcánico. En su porción norte está más separada de la costa (300 km); en cambio en el sur reduce su anchura y se aproxima más al mar. Su altura media es de 2250 m. por su continuidad, sirve de barrera occidental a la Mesa del Centro.

Sierra Madre Oriental: esta provincia, está ubicada en el este del país, tiene una dirección noroeste-sureste, inicia en el sur del estado de Texas justo al norte de la Ciudad de Monterrey en el estado de Nuevo León, tiene un giro hacia el oeste y después hacia el norte, continua hacia el sur a Veracruz hasta su punto de contacto



con el Eje Neovolcánico. El tipo de roca que es más común en su superficie es la sedimentaria, principalmente de origen marino.

Mesa del Centro: es una provincia en su mayor parte plana, ubicada en el centro del país. Se caracteriza por sus amplias llanuras interrumpidas por algunas sierras. Las llanuras de mayor extensión se localizan en la zona de Ojuelos, en el estado de Jalisco y la zona con mayor presencia de sierras en los Altos de Guanajuato, partes de San Luís Potosí y Zacatecas. Su altitud promedio es de 1700 a 2300 m, mientras que las mayores elevaciones llegan a 2500 m de altitud en la sierra de Guanajuato.

b. Subprovincias fisiográficas

La cuenca del río Nazas comprende las siguientes Subprovincias: Bolsón de Mapimí, gran meseta y cañones chihuahuenses, gran meseta y cañones duranguenses, laguna de Mayrán, sierra de la paila, sierras transversales, sierras y llanuras de Durango, sierras y llanuras del norte y sierras y lomeríos de Aldama y Río Grande (Anexo 3) (INEGI, 2001).

6.2.1.6. Sistemas de topofomas

Con base en lo reportado por el Instituto Nacional de Geografía y Estadística (INEGI, 2001b), en la carta temática de Sistema topofomas escala 1: 1 000 000, en el Cuadro 8 se describen los sistemas presentes en la cuenca del río Nazas (Anexo 4).

Cuadro 8. Sistema de topofomas de la cuenca del río Nazas.

Descripción	Superficie (Km ²)	Superficie (%)
Bajada con lomerío	3,868.52	7.93
Bajada típica	1,618.57	3.32
Llanura aluvial	5,346.87	10.97
Llanura aluvial con cañadas	959.67	1.97
Llanura aluvial con lomerío	295.34	0.61
Llanura aluvial con lomerío de piso rocoso o cementado	451.42	0.93
Llanura aluvial de piso de piso rocoso o cementado	345.70	0.71
Llanura aluvial inundable y salina	95.96	0.20
Llanura aluvial salina	1,093.30	2.24



Llanura desértica	928.49	1.90
Llanura desértica de piso rocoso o cementado	704.27	1.44
Llanura desértica de piso rocoso o cementado con lomerío	433.44	0.89
Lomerío con cañadas	1,475.46	3.03

Descripción	Superficie (Km ²)	Superficie (%)
Lomerío con mesetas	9,906.68	20.32
Lomerío ramificado	106.38	0.22
Lomerío ramificado con bajadas	7.06	0.01
Lomerío ramificado con cañadas	1,889.70	3.88
Lomerío típico	44.70	0.09
Meseta basáltica	22.14	0.05
Meseta con cañadas	15.35	0.03
Meseta con malpaís	59.99	0.12
Meseta de gran superficie con cañadas	425.25	0.87
Meseta disectada con lomerío	310.02	0.64
Meseta típica	276.48	0.57
N/A	126.38	0.26
Sierra alta	1,235.58	2.53
Sierra alta con mesetas	8.75	0.02
Sierra baja	546.32	1.12
Sierra baja con lomerío	199.25	0.41
Sierra baja escarpada	112.17	0.23
Sierra baja escarpada con lomerío	609.95	1.25
Sierra baja plegada	82.07	0.17
Sierra baja plegada con lomerío	56.92	0.12
Sierra compleja	1,284.62	2.63
Sierra compleja con lomerío	170.34	0.35
Sierra plegada	1,472.10	3.02
Superficie de gran meseta con cañadas	8,332.48	17.09
Valle abierto de montaña	131.37	0.27
Valle abierto de montaña con lomerío	679.91	1.39
Valle intermontano	622.26	1.28
Valle intermontano con lomerío	2,383.42	4.89
Total	48761.77	100

6.2.1.7. Unidades edáficas

Los datos edafológicos se obtuvieron del Conjunto de datos vectorial edafológico, Escala 1: 250 000 Serie II (Continuo Nacional) (INEGI, 2014). Así mismo, en el

Cuadro 9 se describen los tipos de suelo presentes y sus proporciones de acuerdo con la Organización de las Naciones Unidas para la Alimentación y la Agricultura (Anexo 5) (FAO, 2014).

Cuadro 9. Unidades edafológicas de la cuenca del río Nazas.

Unidad de suelo	Descripción	Superficie (Km ²)	Superficie (%)
Cambisol	Los Cambisoles se desarrollan sobre materiales de alteración procedentes de un amplio abanico de rocas, entre ellos destacan los depósitos de carácter eólico, aluvial o coluvial.	2358.65	4.85
Castañozem	Suelo que tiene un horizonte A mólico no muy duro cuando se seca, con grado de saturación de más de 50% y con relativamente alto nivel de contenido de carbono orgánico.	1434.630	2.95
Feozem	El material original lo constituye un amplio rango de materiales no consolidados; destacan los depósitos glaciares y el loess con predominio de los de carácter básico	8979.52	18.45
Fluvisol	El material original lo constituyen depósitos, predominantemente recientes, de origen fluvial, lacustre o marino. Se encuentran en áreas periódicamente inundadas, a menos que estén protegidas por diques, de llanuras aluviales, abanicos fluviales y valles pantanosos.	34.56	0.07
Litosol	Suelos muy delgados, su espesor es menor de 10 cm, descansa sobre un estrato duro y continuo, tal como roca, tepetate o caliche.	14573.68	29.94
Regosol	Suelos poco desarrollados, constituidos por material suelto semejante a la roca.	4939.87	10.15
Rendzina	Suelos poco profundos (10 - 15 cm) que sobreyacen directamente a material carbonatado (ejemplo roca caliza)	4670.72	9.60
Solonchak	Se encuentran en regiones áridas o semiáridas, principalmente en zonas permanentemente o estacionalmente	669.06	1.37



	inundadas. La vegetación es herbácea con frecuente predominio de plantas halófilas		
Vertisol	Suelos muy arcillosos, con grietas anchas y profundas cuando están secos; si se encuentran húmedos son pegajosos; su drenaje es deficiente	191.49	0.39

Unidad de suelo	Descripción	Superficie (Km ²)	Superficie (%)
Xerosol	Suelos áridos que contienen materia orgánica; la capa superficial es clara, debajo de ésta puede haber acumulación de minerales arcillosos y/o sales, como carbonatos y sulfatos	9301.54	19.11
Yermosol	Suelo semejante a los xerosoles, difieren en el contenido de materia orgánica.	1516.30	3.12
Total		48669.97	100.00

6.2.1.8. Uso de suelo y vegetación

Para definir el uso de suelo y vegetación de la cuenca del río Nazas se utilizó la serie VI de uso de suelo y vegetación (USV) escala 1: 250 000 (INEGI, 2017). Los tipos de USV que predominan en la zona de estudio son: el matorral desértico rosetofilo y micrófilo, pastizal natural con vegetación secundaria arbustiva y pastizal natural (Cuadro 10) (Anexo 6).

Cuadro 10. Uso de suelo y vegetación de la cuenca del río Nazas.

Uso de Suelo y Vegetación	Sup. (km ²)	Sup. (%)
Agricultura de riego anual	909.98	1.86
Agricultura de riego anual y permanente	20.21	0.04
Agricultura de riego anual y semipermanente	1810.18	3.71
Agricultura de riego permanente	5.57	0.01
Agricultura de riego semipermanente	167.26	0.34
Agricultura de riego semipermanente y permanente	169.37	0.34
Agricultura de temporal anual	3742.04	7.67
Agricultura de temporal permanente	1.69	0.00
Asentamientos humanos	124.03	0.25



Bosque de ayarín	4.47	0.00
Bosque de encino	677.99	1.39
Bosque de encino-pino	671.18	1.37
Bosque de mezquite	30.38	0.06
Bosque de pino	2723.04	5.58
Bosque de pino-encino	2274.12	4.66
Bosque de táscate	54.01	0.11
Uso de Suelo y Vegetación	Sup. (km²)	Sup. (%)
Chaparral	386.27	0.79
Cuerpo de agua	128.53	0.26
Desprovisto de vegetación	1.10	0.00
Matorral crasicaule	619.63	1.27
Matorral desértico microfilo	6171.90	12.64
Matorral desértico roseto-filo	7080.75	14.52
Matorral submontano	277.82	0.56
Mezquital xerófilo	57.59	0.11
Pastizal halófilo	503.87	1.03
Pastizal inducido	1168.12	2.39
Pastizal natural	4469.14	9.16
Sin vegetación aparente	107.17	0.21
Vegetación de desiertos arenosos	175.58	0.36
Vegetación gipsofila	13.70	0.02
Vegetación halófila xerófila	581.26	1.19
Vegetación secundaria arbórea de bosque de ayarín	4.83	0.00
Vegetación secundaria arbórea de bosque de encino	244.78	0.50
Vegetación secundaria arbórea de bosque de encino-pino	347.65	0.71
Vegetación secundaria arbórea de bosque de pino	380.60	0.78
Vegetación secundaria arbórea de bosque de pino-encino	530.78	1.08
Vegetación secundaria arbustiva de bosque de encino	1061.03	2.17
Vegetación secundaria arbustiva de bosque de encino-pino	501.34	1.02
Vegetación secundaria arbustiva de bosque de mezquite	5.81	0.01
Vegetación secundaria arbustiva de bosque de pino	1010.93	2.07
Vegetación secundaria arbustiva de bosque de pino-encino	1262.90	2.58
Vegetación secundaria arbustiva de bosque de táscate	3.75	0.00
Vegetación secundaria arbustiva de matorral crasicaule	18.05	0.03
Vegetación secundaria arbustiva de matorral desértico microfilo	1486.17	3.04
Vegetación secundaria arbustiva de matorral roseto-filo	107.34	0.22
Vegetación secundaria arbustiva de pastizal halófilo	217.91	0.44
Vegetación secundaria arbustiva de pastizal natural	5700.00	11.68
Vegetación secundaria arbustiva de vegetación de desiertos arenosos	12.00	0.02
Vegetación secundaria arbustiva vegetación halófila xerófila	561.49	1.15



Vegetación secundaria herbácea de bosque de pino	1.83	0.00
Zona urbana	174.48	0.35
Total	48761.77	100

6.2.1.9. Geología

En lo que respecta a la parte geológica en la cuenca del río Nazas se presentan cuatro tipos de rocas: ígnea extrusiva, ígnea intrusiva, metamórfica y sedimentaria (INEGI, 2011). La mayor superficie corresponde a las ígneas extrusivas (Cuadro 11) (Anexo 7).

Cuadro 11. Geología de la cuenca del río Nazas.

Clase	Tipo	Era	Sup. (km ²)	Sup. (%)
Ígnea extrusivas	Ígnea extrusiva ácida	Cenozoico	19262.89	39.50
	Ígnea extrusiva básica	Cenozoico	480.52	0.99
	Ígnea extrusiva intermedia	Cenozoico	918.39	1.88
	Volcanoclástico	Cenozoico	42.10	0.09
Ígnea intrusiva	Ígnea intrusiva ácida	Mesozoico/cenozoico	227.63	0.47
	Ígnea intrusiva intermedia	Mesozoico/cenozoico	80.23	0.16
Metamórfica	Esquisto	Paleozoico	6.67	0.01
	Metasedimentaria	Paleozoico	39.77	0.08
Sedimentaria	Arenisca	Mesozoico	215.55	0.44
	Arenisca-conglomerado	Cenozoico	29.70	0.06
	Brecha sedimentaria	Cenozoico	26.64	0.05
	Caliza	Mesozoico	3777.28	7.75
	Caliza-lutita	Mesozoico	1794.30	3.68
	Caliza-yeso	Mesozoico	179.80	0.37
	Conglomerado	Cenozoico	9000.23	18.46
	Lutita-arenisca	Mesozoico	813.99	1.67
Suelo	--	Cenozoico	11752.84	24.10
Cuerpo de agua	--	--	113.23	0.23
Total			48761.77	100

Fuente: INEGI,

6.2.1.10. Distrito de Riego 017

En la región hidrológico-administrativa “Cuencas Centrales del Norte” de la Región Hidrológica Nazas–Aguanaval, se ubica el Distrito de Riego 017 (DR017) “Región Lagunera” que abarca parte de los estados de Durango y Coahuila (Anexo 8).

El DR017 cuenta con 38,031 usuarios con una superficie total de hectáreas de 71,964 ha, de las cuales la superficie regada total fue de 65,612 ha, teniendo un volumen de agua total de 1,049,512,001.059 m³ (CONAGUA, 2019).

6.2.2. Análisis de la información meteorológica (precipitación y temperatura)

6.2.2.1. Estimación meteorológica

Se realizó una revisión exhaustiva de la información meteorológica disponible, obteniéndose información del Servicio Meteorológico Nacional (SMN) de la Comisión Nacional del Agua (CONAGUA). Se contabilizaron 61 estaciones climáticas ubicadas dentro y fuera de la cuenca con el propósito de cubrir toda el área de estudio, de las cuales se obtuvo información para su análisis (Anexo 9); sin embargo, de las 61 estaciones, 29 de ellas se encuentran suspendidas y 32 en operación (Cuadro 12).

Los datos que se tomaron en cuenta corresponden a variables mensuales con información mayor a 30 años: precipitación total mensual, temperatura máxima mensual y temperatura mínima mensual.

Cuadro 12. Estaciones meteorológicas.

Id	Estación	Clave	No. de años de registro	Periodo		Estatus
1	Sardinas, San Bernardo	10078	40	1970	2009	Suspendida
2	Guanaceví (Smn), Guanaceví	10029	88	1922	2009	Suspendida



3	San Bernardo, San Bernardo	10138	41	1977	2017	Suspendida
4	Santa María Del Oro, El	10075	42	1967	2009	Suspendida
5	Cienega De Escobar, Tepe	10007	45	1965	2009	Suspendida
6	Indé, Indé	10143	31	1979	2009	Suspendida
7	El Palmito, Indé	10021	72	1938	2009	Suspendida
Id	Estación	Clave	No. de años de registro	Periodo		Estatus
8	General Escobedo, El Oro	10149	40	1978	2017	Suspendida
9	J. Salome Acosta, Santia	10035	39	1969	2009	Suspendida
10	Santiago Papasquiari (Sm	10100	88	1921	2009	Suspendida
11	El Casco, San Pedro Del	10142	39	1979	2017	Suspendida
12	Rodeo (Dge), Rodeo	10098	63	1940	2009	Suspendida
13	Higueras, Rodeo	10166	32	1986	2017	Suspendida
14	El Cuarto, San Juan Del	10028	61	1948	2009	Suspendida
15	Panuco De Coronado, Panu	10052	43	1967	2009	Suspendida
16	Luis Moya, Peñon Blanco	10150	29	1980	2009	Suspendida
17	Cuauhtémoc, Cuencame	10135	33	1977	2009	Suspendida
18	Cuencame, Cuencame	10012	62	1948	2009	Suspendida
19	Cañón Fernández, Cuenca	10004	53	1944	2009	Suspendida
20	Torreón (Obs), Torreón	5040	33	1971	2003	Suspendida
21	El Cuije, Matamoros	5027	69	1940	2008	Suspendida
22	Presa De Guadalupe, San	5028	52	1965	2016	Suspendida
23	Tlahualilo, Tlahualilo	10085	46	1963	2008	Suspendida
24	Cinco De Mayo, San Pedro	10008	46	1964	2009	Suspendida
25	La Cadena, Mapimi	10140	39	1979	2017	Suspendida
26	Escalon (Dge), Jiménez	8171	39	1969	2009	Suspendida
27	Ceballos, Mapimí	10005	53	1956	2009	Suspendida
28	El Derrame, Mapimí	10020	45	1966	2011	Suspendida
29	Santa Clara, Santa Clara	10074	47	1963	2009	Suspendida
30	Guadalupe Y Calvo (Dge),	8172	56	1942	2012	Operando
31	Cendradillas, Guanacevi	10006	54	1961	2016	Operando
32	Rosario, Ocampo	10061	47	1963	2016	Operando
33	Canutillo, Ocampo	10141	37	1979	2016	Operando
34	La Huerta, Topia	10037	44	1969	2016	Operando
35	Vascogil, Canelas	10087	47	1967	2016	Operando
36	El Cantil, Santiago Papa	10018	59	1953	2016	Operando
37	San Diego, Santiago Papa	10122	44	1973	2016	Operando
38	Los Altares, Santiago Pa	10121	44	1973	2016	Operando
39	Huahuapan, San Dimas	10031	49	1966	2016	Operando
40	El Salto (Dge), Pueblo N	10093	51	1963	2016	Operando
41	Navios Viejos, Durango	10048	52	1964	2016	Operando
42	Otinapa, Durango	10051	52	1963	2016	Operando
43	El Pueblito, Durango	10023	53	1963	2016	Operando



44	Santiago Bayacora, Durango	10076	53	1963	2016	Operando
45	Canatlan (Dge), Canatlan	10090	51	1963	2016	Operando
46	San Bartolo, Canatlan	10063	73	1942	2016	Operando
47	Tejamen, Nuevo Ideal	10083	47	1969	2016	Operando

Id	Estación	Clave	No. de años de registro	Periodo		Estatus
48	Chinacates, Santiago Pap	10016	53	1963	2016	Operando
49	Coneto De Comonfort, Con	10129	42	1976	2017	Operando
50	Guadalupe Victoria (Dge)	10030	53	1963	2016	Operando
51	Narciso Mendoza, Poanas	10047	53	1963	2016	Operando
52	Colonia González Ortega,	32021	44	1970	2016	Operando
53	Juan Aldama, Juan Aldama	32028	52	1963	2016	Operando
54	Presa La Flor, Torreón	5029	54	1963	2016	Operando
55	Pedriceña, Cuencame	10055	64	1942	2016	Operando
56	Nazas, Nazas	10049	49	1965	2013	Operando
57	Emiliano Zapata, Viesca	5139	39	1978	2016	Operando
58	San Pedro, San Pedro	5036	54	1963	2016	Operando
59	Mapimí, Mapimí	10045	50	1963	2012	Operando
60	San Luis Del Cordero (Dge)	10132	41	1976	2017	Operando
61	Peñón Blanco (Dge)	10131	42	1976	2017	Operando

6.2.2.2. Análisis de la información meteorológica

El análisis de la información meteorológica se realizó mediante el *software* HOMER (*Homogenization software in R*) desarrollado por Mestre *et. al.*, (2012) entre los años 2007-2011 mediante el proyecto europeo llamado COST Action ES0610. HOMER es un *software* para homogenizar variables climáticas esencialmente en escalas de tiempo mensual y anual. La metodología se basa en la segmentación óptima con programación dinámica, en la aplicación de un modelo de dos factores en toda la red para la detección y corrección, asimismo, en la coordinación de procesos de detección de escalas plurianuales y mensuales. Este fue construido con base a las características de otros métodos de homogenización como PRODIGE (Causinus y Mestre, 2004), ACMANT (Domonkos, 2011), Climatol (Guijarro, 2004), y el método joint-segmentación (*Package cghseg*) (Picard *et. al.*, 2011).



6.2.2.3. Homogenización

Los datos climáticos históricos de buena calidad son fundamentales para el análisis y la comprensión de la variabilidad de estos y, a su vez, de la presencia de sequías e indicios de cambio climático. Para el análisis de los datos climáticos es necesario contar con una serie de tareas preliminares como el rescate de datos, lo que garantiza la integridad del conjunto de datos y control de su calidad, con el propósito de identificar y eliminar observaciones erróneas. La homogenización de series temporales climáticas busca detectar y suprimir los sesgos sistemáticos que varían en las series temporales del clima. La homogenización proviene del griego antiguo que significa “de la misma naturaleza”. En la ciencia climática, significa que los valores de una serie temporal climática deben ser de la misma naturaleza, es decir, que sean comparables. La mayoría de las series climáticas a largo plazo no cumplen con este principio y no son homogéneas, por lo tanto, no se ajustan para un análisis estadístico de cambio climático (WMO, 2018).

El proceso de homogenización consta de tres fases: detección, ajuste y validación.

1) La detección consiste en analizar las series climáticas para localizar inhomogeneidades abruptas o escalonado, esta se realiza mediante pruebas estadísticas y herramientas visuales (información documental sobre los cambios de clima; 2) el ajuste, es un proceso que utiliza enfoques estadísticos para reducir los sesgos introducido por las inhomogeneidades, para hacer que la serie se comparable. Estos dos primeros procesos se deben de realizar mediante la comparación de una serie con las series vecinas; esto se le conoce como homogenización relativa, la cual se basa en el principio que las estaciones cercanas y/o vecinas comparten el mismo clima y también gran parte de la evolución temporal. En caso que no se utilicen las comparaciones de las estaciones vecinas, tiene como resultado mayor incertidumbre en las series homogeneizadas; esto se conoce como homogenización absoluta. Finalmente, 3) validación, consiste en evaluar el trabajo y revisar los datos homogenizados, se deben revisar las series individuales y valorar si los nuevos valores tienen sentido, es decir, si conservan el

ciclo estacional y si los valores están en un rango esperado para la estación de estudio (WMO, 2018).

6.2.2.4. Homogenización de datos climáticos con el *script HOMER.R* de R

Para iniciar la homogenización de las series climáticas mensuales de, precipitación, temperatura mínima y máxima, se sometieron las variables a un análisis estadístico de control de calidad de información, comparación de series por medio de correlaciones, se agregaron y complementaron los valores faltantes o perdidos y finalmente la homogenización de las series (Figura 6). Dicho lo anterior, el análisis se realizó mediante un *script HOMER.R* propuesto por Mestre *et. al.*, (2012) que desarrolló en R (*The R Project for Statistical Computing*) en su versión 2.15.2. (Figura 7).

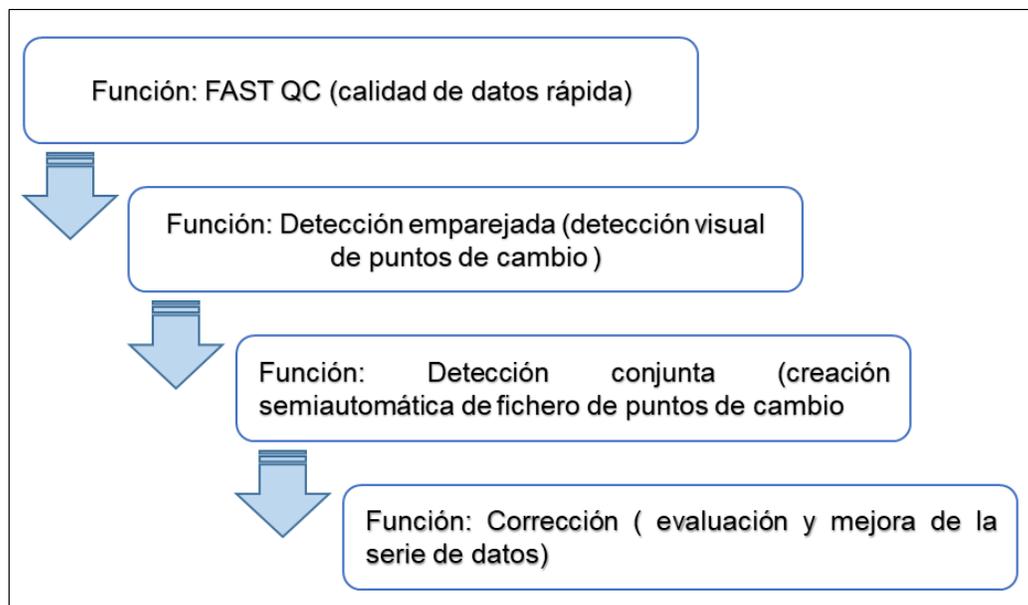


Figura 6. Diagrama del proceso de homogenización para series de tiempo.

```
> source("C:\\Users\\Gaeta\\Documents\\HOMER_precipitacion\\HOMER.R")

_____

. /,-Y _____
1.Y
i ^
i |
i |
1 |
X | \ \
( \_ \
z,--
Y |
| |
j |

DOH!

_____

HOMER 2.6

_____

Dataset parameters
```

Figura 7. Inicio del script HOMER.R en R.

HOMER tiene una estructura de directorios donde contiene la información que va generando el usuario, el directorio está organizado en archivos: *.ra* y/o *.raw* donde se ubican los datos originales; *.qc* donde los datos han pasado el control de calidad; *.ho* datos mensuales homogeneizados por HOMER; *.fig* gráficos que se generan, *.meta* muestra los gráficos de control de calidad más la estadística y *.temp* otros datos del proceso de homogeneización (Figura 8).



Figura 8. Directorio de HOMER.



6.2.2.5. Menú de inicio de HOMER

En la Figura 9 se muestra el menú principal de las herramientas de HOMER y también un listado con una breve descripción de cada una de ellas.

- Estación de referencia: archivo del listado de las estaciones de estudio, precipitación, temperatura mínima y máxima mensual.
- Archivos de entrada: archivo del directorio de HOMER (*./ra*, *./qc*, *./ho*, etc.).
- Nombre del parámetro: variable con la que se va a trabajar (*pp*, *tn* y *tx*).
- Unidad para salidas gráficas: unidad con la que se mide la variable ya en milímetros (mm) para el caso de precipitación y grados centígrados (°C) para temperaturas.
- Tipos de parámetros: se selecciona el tipo de parámetro, temperatura o lluvia.
- Salidas gráficas: tipo de formato de salida de las gráficas.
- Intercomparación entre vecinos: consiste en el tipo de comparación estadístico, que va desde todas las series en su conjunto, de forma geográfica, por correlación o por distancia. En caso que se utilice el tipo por correlación, se recomienda seleccionar >0.999 , y por último elegir el número de estaciones con las que la estación de referencia se desea comparar, pueden ser desde 5, 10, 15 o todas las estaciones (cuando se utilizan todas las estaciones significa que la zona de estudio es homogénea geográficamente).
- Opción de comparación de temporada para detección por pares: la comparación entre series puede ser de forma anual + estaciones del año, anual o mensual. Para el caso de las temperaturas es recomendable elegir la opción “anual + estaciones”.
- Opción de corrección para parámetros acumulativos: se recomienda utilizar la opción por *default* “estimación anual de coeficientes” por dar mejores resultados.
- Opciones para visualización de series: consiste dar diseño a las gráficas de salida.



- Método que se desea usar: muestra los tipos de control de calidad que maneja HOMER.
- Control de calidad rápida: Identificación rápida de valores atípicos.
- Homogenización: procesos de homogenización.
- Detección por pares: tiene como salida gráficos en los cuales se deben detectar de manera visual los puntos de cambio de las series.
- Detección conjunta: crea gráficos donde compara la detección emparejada y de forma conjunta.
- Corrección: completa los valores perdidos y/o faltantes de las series.

El análisis de la información climática se debe aplicar para cada variable de estudio (pp, tn, tx) por separado, de acuerdo al siguiente orden: como primer paso el control de calidad de datos y posteriormente los procesos de homogenización (detección por pares, detección conjunta y corrección).



```
Dataset parameters

Network number (ref station file)      : 1  → 1
Header of input files (ex: ratx, qcrr) : rapp → 2
Parameter name (for graphic outputs)   : pp  → 3
Unit for graphic outputs (c for celsius) : mm  → 4

Parameter type → 5
Physical parameters (Temperature, Pressure, ...)
=> Additive correction      : additive (return)
Cumulative parameters (Rainfall, Sunshine Duration, ...)
=> Multiplicative correction : log ratio (log) or ratio (r) comparisons
Type                       : r

Graphic outputs → 6
pdf (return), postscript (ps), svg (svg), png (png)
Output option           : r

Intercomparison Neighbourhood → 7
All series (return), geographic (g) or correlation (c) distance
Intercomparison type     : c
Minimum correlation r     : .9999
!! Warning, next parameter
!! superseeds r.min or d.max
Minimum number of neighbours : 10

Season comparison option for pairwise detection → 8
Annual+seasons (return), annual (a) or monthly (m)
Season option           : r
Correction option for cumulative parameters → 9
Annual coefficient estimation (return, default) or monthly (m) warning: not$
Correction option       : r

Options for series visualization → 10
Linear trend?          yes (return)/n : r
Smoothing option?     yes (return)/n : r
Polygon fill?         yes (return)/n : r
return for red/blue gy=green/yellow.. : r

-----

What do you wish, Master/Mistress? → 11

FAST QUALITY CONTROL
-> Fast CLiMATOL checks      type i
-> Fast QC                  type f → 12
-> Outlier file creation?   type o
-> Removal of outliers?     type r

HOMOGENISATION → 13
-> Pairwise detection?      type d → 14
-> Joint detection?         type j → 15
-> Assess Month of change   type m
-> Correction?              type c → 16
-> Visualization?         type v
-> New neighbourhood        type n
-> Change hinteraction hoption :-) type h
-> Break file creation/modification? type b
-> Break file edition?      type e
-> Quit?                    type q

Your choice : f|
```

Figura 9. Herramientas de HOMER.



6.2.2.6. Preparación de datos para HOMER

Para iniciar el proceso de análisis mediante HOMER es necesario organizar los datos climáticos. A continuación, se describe el formato que se utilizó:

- Crear un archivo donde contenga el listado de las estaciones seleccionadas (61), el registro de datos fue dividido en nueve campos para cada estación. Los campos son: 1) nombre del archivo, el cual (se construye de acuerdo con la nomenclatura “raxxx0000000.txt”, donde *ra* se utiliza para indicar los datos originales o el código de estatus, *xxx* se debe sustituir por la variable que se va analizar ya sea precipitación mensual (*ppm*), temperatura mínima mensual (*tnm*) y temperatura máxima mensual (*txm*); los ocho dígitos (ceros), son para enumerar las estaciones y, por último, *.txt* es el tipo de formato que se le debe dar al archivo; 2) grados de longitud; 3) minutos de longitud; 4) segundos de longitud; 5) grados de latitud; 6) minutos de latitud; 7) segundos de latitud; 8) elevación y 9) nombre de la estación. En la siguiente Figura 10 se muestra la forma del archivo del listado de las estaciones.

A			B			C			D			E			F			G			H			I		
No. Estación	1	No. Estación	1	No. Estación	1	Longitud			Latitud									Id								
rappm00000001d.txt	3	ratnm00000001d.txt	3	ratxm00000001d.txt	105	33	57	26	5	3	1	10078														
rappm00000002d.txt	4	ratnm00000002d.txt	4	ratxm00000002d.txt	105	57	6	25	55	59	1	10029														
rappm00000003d.txt	5	ratnm00000003d.txt	5	ratxm00000003d.txt	105	31	36	26	0	16	1	10138														
rappm00000004d.txt	6	ratnm00000004d.txt	6	ratxm00000004d.txt	105	22	0	25	57	12	1	10075														
rappm00000005d.txt	7	ratnm00000005d.txt	7	ratxm00000005d.txt	105	44	47	25	36	3	1	10007														
rappm00000006d.txt	8	ratnm00000006d.txt	8	ratxm00000006d.txt	105	13	11	25	34	32	1	10143														
rappm00000007d.txt	9	ratnm00000007d.txt	9	ratxm00000007d.txt	105	0	13	25	36	52	1	10021														
rappm00000008d.txt	10	ratnm00000008d.txt	10	ratxm00000008d.txt	105	15	0	25	30	0	1	10149														
rappm00000009d.txt	11	ratnm00000009d.txt	11	ratxm00000009d.txt	105	26	56	25	13	14	1	10035														
rappm00000010d.txt	12	ratnm00000010d.txt	12	ratxm00000010d.txt	105	24	55	25	3	0	1	10100														
rappm00000011d.txt	13	ratnm00000011d.txt	13	ratxm00000011d.txt	104	35	2	25	32	54	1	10142														
rappm00000012d.txt	14	ratnm00000012d.txt	14	ratxm00000012d.txt	104	33	45	25	11	0	1	10098														
rappm00000013d.txt	15	ratnm00000013d.txt	15	ratxm00000013d.txt	104	34	35	25	5	22	1	10166														
rappm00000014d.txt	16	ratnm00000014d.txt	16	ratxm00000014d.txt	104	28	51	24	56	42	1	10028														
rappm00000015d.txt	17	ratnm00000015d.txt	17	ratxm00000015d.txt	104	19	59	24	32	18	1	10052														
rappm00000016d.txt	18	ratnm00000016d.txt	18	ratxm00000016d.txt	103	57	51	24	33	10	1	10150														
rappm00000017d.txt	19	ratnm00000017d.txt	19	ratxm00000017d.txt	103	47	44	24	15	5	1	10135														
rappm00000018d.txt	20	ratnm00000018d.txt	20	ratxm00000018d.txt	103	41	54	24	52	10	1	10012														
rappm00000019d.txt	21	ratnm00000019d.txt	21	ratxm00000019d.txt	103	46	25	25	15	55	1	10004														
rappm00000020d.txt	22	ratnm00000020d.txt	22	ratxm00000020d.txt	103	25	52	25	31	11	1	5040														
rappm00000021d.txt	23	ratnm00000021d.txt	23	ratxm00000021d.txt	103	20	25	25	41	48	1	5027														

Figura 10. Formato del archivo del listado las estaciones climáticas.



- El archivo tiene que estar en formato *.txt*, y deberá estar descrito por cada variable, por ejemplo (Figura 11):
 - 000001stations.txt para precipitación mensual;
 - 000002stations.txt para temperatura mínima mensual y
 - 000003stations.txt para temperatura máxima mensual.

Archivo	Edición	Formato	Ver	Ayuda									
1970	-999.9	-999.9	-999.9	-999.9	-999.9	56.2	62.3	98.3	163.3	14.6	0	0	
1971	0	0	0	0	1	45.1	89.3	156	65.8	75.8	0	15.5	
1972	7.1	0	0.3	0	24.9	47.5	101.8	54.6	152.9	22.5	42	0	
1973	0	22.9	0	0	10.3	37.7	129.6	240	132.3	8.3	0	0.3	
1974	0	0	0	0	7.5	6.6	103.1	134.6	131.1	1.9	37.3	14.1	
1975	0	1.2	0	0	0	69	149.1	92.2	71.4	3.8	0	12.8	
1976	0	0	0	10.7	5.9	99.3	215	68.1	112	34.3	30.9	2.1	
1977	20.4	0	0	0.5	3.5	194.3	109.8	67.7	10.9	20.8	0	0	
1978	0	4	2.8	16.8	16.4	51.8	140.2	129.3	139.7	46.8	0	0	
1979	11	0	9	2	20.6	148.8	76.7	149.4	16.4	0	0	2.9	
1980	1.4	5.4	0	0	0	23	104.9	130.3	206.3	13.5	12.8	0	
1981	32.7	0	3	11.4	0	103.4	94.4	226.8	120.5	81.8	0	14.5	
1982	9.4	0	0.5	4.4	6.3	5.3	56.3	51.5	69.9	27.5	23.2	18.2	
1983	17.3	0	12.4	0	15.4	30.8	44.1	148.9	45.6	33.4	5.7	1.2	
1984	62.3	3.8	0	0	22.1	119.6	250	80.6	14.4	8.1	3.3	46.8	
1985	27	1.8	0	30.3	5.7	104	107.2	135.1	53.3	19.3	2	0	
1986	12.5	-999.9	0	22.2	27.1	111.8	140.9	116	198.9	46.5	6.6	30.5	
1987	2.5	0	0.5	17	20	31.2	223.9	132.3	58.8	-999.9	0	2.1	

Figura 11. Archivo en formato *.txt* de las estaciones climáticas por variable.

Como segundo paso se creó un archivo por cada estación y cada variable como se mencionó en el punto anterior, cuyas características son:

- El formato deberá contar con 13 campos de registro, un registro por cada año. El primer campo corresponde al año; los doce siguientes son los valores de las variables de enero a diciembre.
- Los valores perdidos por cada estación y cada variable se deberán sustituir por la expresión de -999.9 (Figura 12).
- El archivo por cada estación deberá estar en formato *.txt*



	A	B	C	D	E	F	G	H	I	J	K	L	M	N
1		Año	Ene	Feb	Mar	Abr	May	Jun	Jul	Ago	Sep	Oct	Nov	Dic
2	LLUVIA TOTAL MEN	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13
3		1923	12.0	0.0	5.9	0.0	4.0	41.8	115.3	154.5	96.3	8.8	88.0	69.0
4		1924	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0					0.0	0.0
5		1925	0.0	0.0	5.0	0.0	0.0	128.0	71.0	178.0	68.5	25.5	2.0	57.5
6		1926	33.0	5.0	0.0	4.0	0.0	113.0	157.0	168.0	84.0	50.5	0.5	0.0
7		1927	0.0	9.0	0.0	0.0	29.5	83.5	168.0	49.0	102.5	23.5	0.0	37.5
8		1928	1.0	9.0	6.5	0.0	39.0	30.0	153.0	88.0	123.0	8.0	24.0	2.0
9		1929	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	4.0	110.5	99.0	38.5	21.5	6.0	3.0
10		1930	0.0	25.0	0.0	5.0	7.5	84.5	116.5	81.0	15.5	115.0	23.0	44.0
11		1931	85.0	26.0	0.0	14.0	69.0	20.0	172.0	117.5	42.0	14.5	0.0	5.0
12		1932	-999.9	1.0	-999.9	-999.9	-999.9	-999.9	149.0	111.0	63.0	32.0	0.0	21.0
13		1933	-999.9	-999.9	-999.9	-999.9	-999.9	-999.9	-999.9	-999.9	-999.9	-999.9	-999.9	-999.9
14		1934	0.0	1.2	0.0	4.6	57.7	47.1	172.4	68.6	94.3	7.5	0.0	26.4
15		1935	12.5	7.5	0.0	0.0	3.0	127.1	11.5	9.1	101.0	39.0	0.0	0.3
16		1936	0.0	0.0	0.0	37.4	46.7	2.2	187.5	140.9	244.0	70.2	18.0	67.0
17		1937	41.5	0.0	0.0	0.0	2.0	135.0	92.4	82.6	186.5	17.0	0.0	46.0
18		1938	0.0	8.0	0.0	10.0	0.0	76.0	263.0	123.5	112.5	4.0	3.5	6.0
19		1939	7.0	0.0	0.0	0.0	11.0	66.5	31.0	175.5	76.0	51.0	12.0	79.0
20		1940	0.0	0.0	3.0	0.0	28.0	41.0	89.5	85.0	59.0	32.0	88.5	6.0
21		1941	0.0	4.0	12.0	6.0	17.0	30.0	129.0	167.5	106.0	58.0	4.0	45.0
22		1942	2.0	0.0	0.0	0.0	0.2	0.1	67.9	111.0	79.0	35.0	0.0	0.0
23		1943	12.0	0.0	0.0	0.0	-999.9	249.0	74.0	97.0	132.0	58.0	11.8	14.0

Figura 12. Formato de la estación por cada variable.

6.2.2.7. Proceso de homogenización con HOMER

Para este trabajo se deben considerar algunos aspectos teóricos de homogenización. El objetivo de estos procedimientos es detectar las no homogeneidades. En relación con el tema, es importante dar soluciones a los problemas matemáticos que se presenten, tal es el caso de la detección de valores atípicos dentro de las series climáticas.

Para la aplicación del método de control de calidad de datos es necesario definir la determinación de la vecindad de la comparación entre las estaciones. HOMER presenta tres opciones: 1) usando todas las estaciones (esta se recomienda cuando se tienen redes pequeñas de estaciones y tienen entre ellas buena correlación), 2) distancia geográfica (esta opción se recomienda solo cuando la zona de estudio es homogénea) y, 3) distancia estadística o correlación (recomendable para redes de 10 estaciones o más). Las últimas dos opciones permiten especificar el mínimo de



comparaciones a realizar. Para el caso concreto de este estudio se realizó por el método 3) distancia estadística o correlación, se aplicó para las tres variables climáticas, precipitación, temperatura mínima y máxima mensual, con una red de 61 estaciones por variable y se indicó una correlación de 0.999 para un mínimo de 10 estaciones.

Hay dos tipos de correcciones según el tipo de parámetro: sí es físico (temperatura, presión atmosférica etc.) se usa la corrección aditiva; y sí es un parámetro acumulativo (como la precipitación, horas brillo) se usa la corrección multiplicativa.

Herramienta control de calidad: en HOMER se aplicó la herramienta de “Fast QC” (control de calidad rápido), que consistió en la comparación de las estaciones y la identificación rápida de *outliers* (valores atípicos) y así mismo es una primera impresión visual y cualitativa de las potenciales de no homogeneidades presentes en una estación.

En las Figuras 13, 14 y 15 se presentan de forma demostrativa los resultados de la aplicación de la herramienta Fast QC de la estación 10048 (son de los 12 meses del año por cada estación, pero a manera de ejemplo solo se muestran cuatro meses correspondientes al periodo de enero-abril). Donde los puntos rojos representan la estación candidata, las cruces negras son las estaciones de referencia con las que se está comparando y las flechas rojas indican los *outliers*, es decir, valores atípicos o valores fuera de rango.

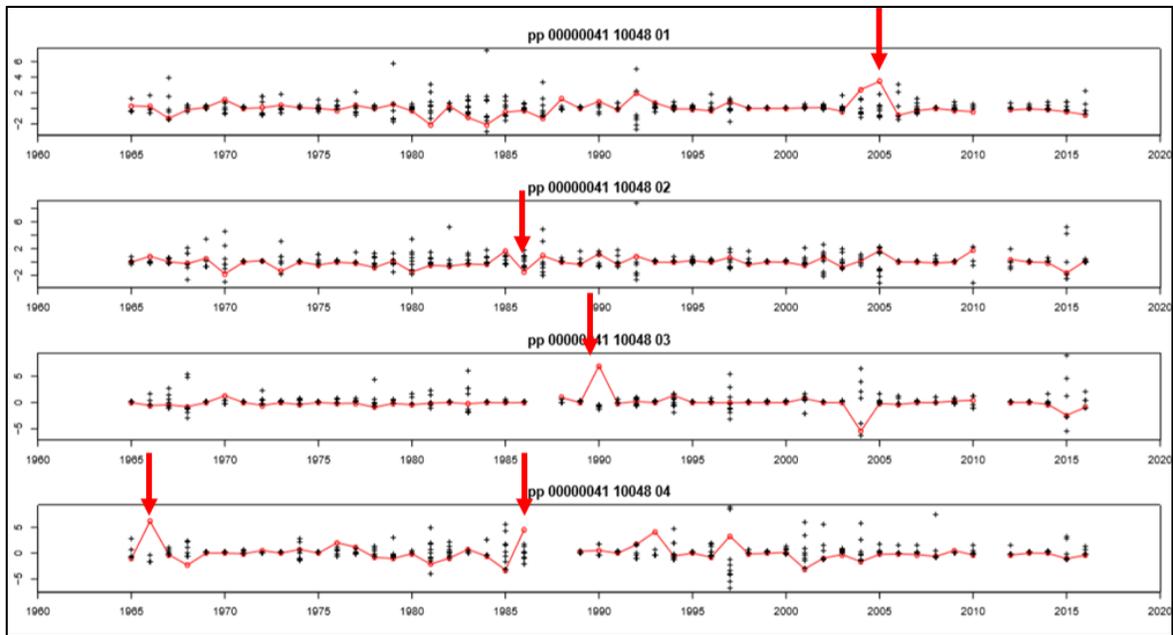


Figura 13. Aplicación de Fast QC en la variable precipitación.

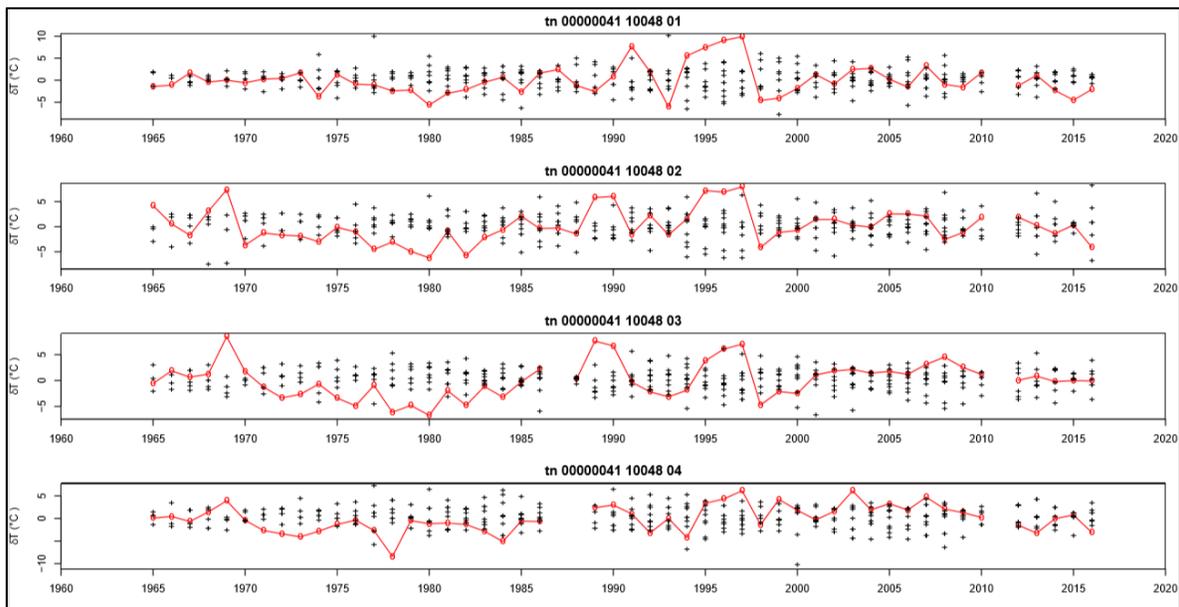


Figura 14. Aplicación de Fast QC en la variable temperatura mínima.

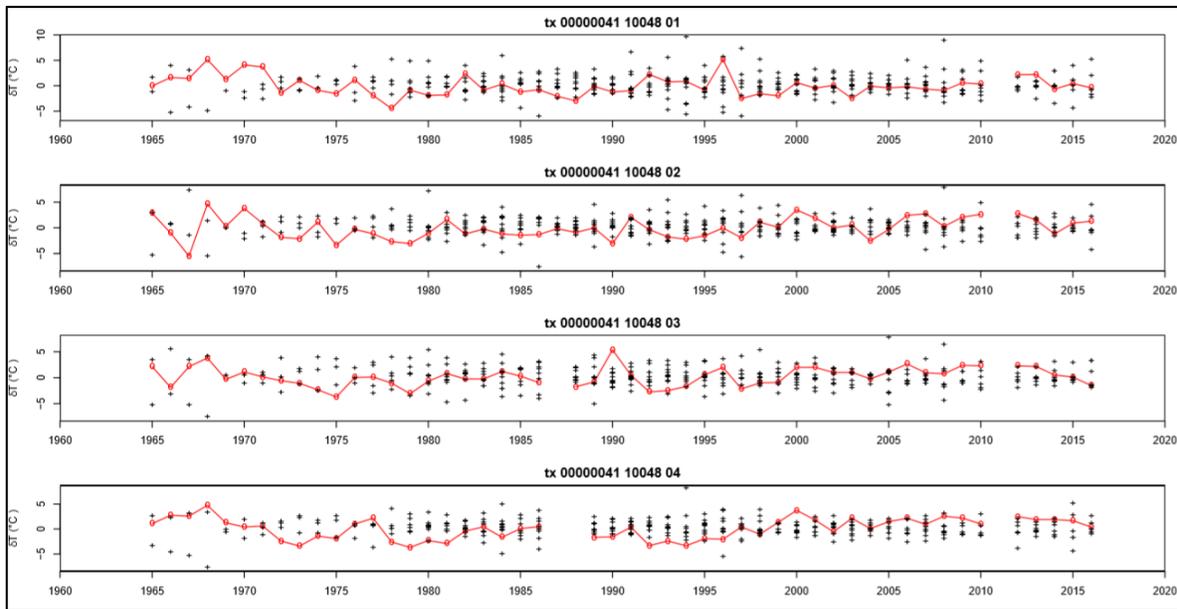


Figura 15. Aplicación de Fast QC en la variable temperatura máxima.

Una vez terminado el proceso del control de calidad, se procedió a utilizar las herramientas más destacadas para la homogenización en HOMER, que combinan la detección y la corrección de datos. Mestre *et. al.* (2012), describe en su metodología las bases teóricas del proceso de homogenización. Los siguientes métodos se ejecutaron de forma sucesiva y repetitiva.

Herramientas detección emparejada (*Pairwise Detection*) y detección conjunta (*joint Detection*): es un método combinatorio de prueba, donde cada cada par de parámetros de entrada, se prueba las combinaciones discretas posibles de dichos parámetros. Se aplicó a todas las estaciones de estudio, y consistió en estimar los puntos de cambio que existe entre una estación candidata y entre cada una de sus referencias (comparación con otras 10 estaciones). Como resultado, se obtiene un gráfico de salida (Figura 16), el cual determina de forma semi-objetiva los puntos de cambio presentes en la estación. La comparativa por pares se ordenó de arriba abajo en función de los valores de la desviación estándar del ruido, cuanto más bajo es el valor mayor es la capacidad de detección de los puntos de ruptura. En cuanto al proceso de detección conjunta, tiene una gran similitud al proceso descrito anteriormente, genera como salida un gráfico en donde fusiona ambos procesos y



determina para cada estación el número y posición más probable de puntos de cambio.

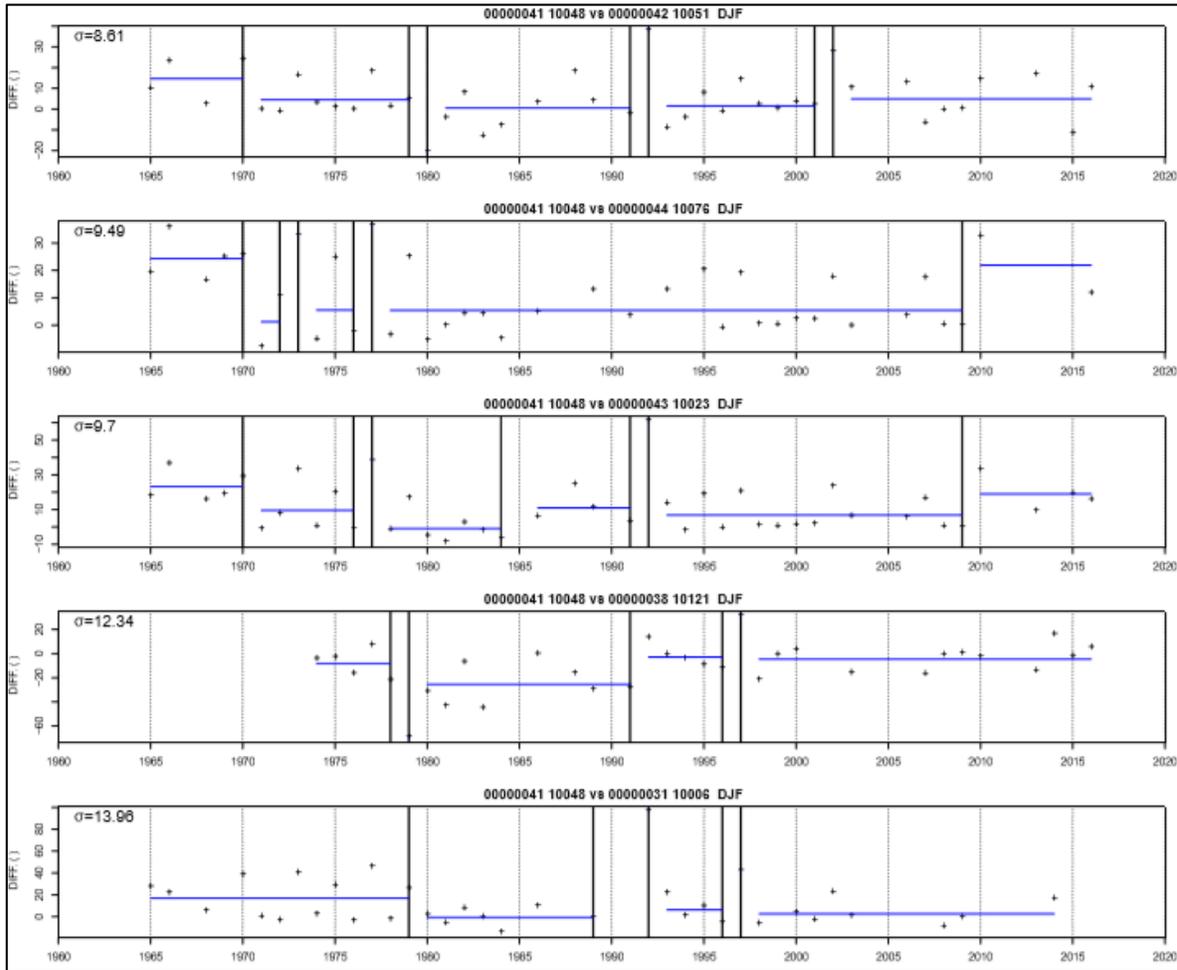


Figura 16. Gráfico de salida de la detección emparejada con HOMER en la estación 10048.

Corrección: una vez definidos los puntos de ruptura de las estaciones, se procedió a la corrección o ajuste de las series, así se generó la primera versión de series homogenizadas completas. El ajuste de las series mensuales se realizó mediante un modelo ANOVA de dos factores, es decir, un análisis de varianza que consiste en contrastar más de dos medias, este modelo para la corrección de las series no homogéneas, que mejora significativamente los resultados en comparación de otros. Además, es importante tomar en cuenta que este modelo permite la



imputación de datos faltantes y la corrección de los valores fuera de rango. Dado que el modelo de dos factores tiene en cuenta el cambio de puntos en la serie, realiza la reconstrucción imparcial de los valores perdidos.

6.2.3. Cálculo de índices de sequía

No existen mecanismos que eviten las ocurrencias de sequías, no obstante, el análisis de la información climática, meteorológica e hidrológica, ayudan a la identificación, caracterización y valoración de este fenómeno ambiental, lo cual representa una fuente de información para planear y optimizar el uso de los recursos hídricos. Así como para tomar medidas de adaptación para mitigar los efectos negativos que suelen ser consecuencia de la presencia de sequías, más aún en zonas donde este recurso es tan escaso, donde se compiten diversos sectores económicos (agricultura, ganadería, minería, industria, etc.) con el propio consumo humano, como lo es en la cuenca del río Nazas. Debido a lo anterior, en este trabajo se aplicaron algunos elementos de análisis mediante el estudio, selección e implementación de índices de sequía tipo meteorológico a la zona de estudio, de manera específica se encontraron dos índices para cumplir esta tarea: Índice Estandarizado de Precipitación (SPI) y el Índice de Precipitación Evapotranspiración Estandarizada (SPEI).

6.2.3.1. Cálculo del Índice Estandarizado de Precipitación (SPI)

Como lo menciona Mckee *et. al.*, (1993), el SPI es con base en una probabilidad estadística de ocurrencia de precipitación y fue diseñado para comportarse como un indicador temporal y espacial de la sequía. Se calcula mediante una serie de datos de precipitación, de preferencia con un mínimo de 30 años o más de registros para cada estación meteorológica. La serie debe ser ajustada a una distribución Gamma, ya que es la mejor en cuanto a series de precipitaciones mensuales; una vez que se obtenga la probabilidad acumulada con la distribución Gamma, esta es transformada a una distribución normal con una media igual a cero y una desviación estándar igual a uno, es decir, el valor que representa SPI. Las escalas temporales del SPI van de los 3, 6, 12, 24, o 48 meses, lo cual permite evaluar déficits de



precipitación, desde agua subterránea, embalses, humedad del suelo y escurrimientos superficiales. Ravelo *et. al.* (2016) considera que un periodo de sequía comienza cuando el SPI alcanza un valor de -0.5 y que este mismo termina cuando los valores retornan a ser positivos.

El SPI se calculó en el *software R (The R Project for Statistical Computing)* mediante un paquete estadístico llamado SPEI desarrollado por Vicente-Serrano *et. al.* (2010), el cual contiene un conjunto de funciones para el cálculo de la evapotranspiración potencial y de índices de sequía entre ellos el SPI y SPEI.

Para realizar el cálculo del SPI, fueron necesarios los datos de las estaciones climatológicas que se sometieron a control de calidad y homogenización, con el fin de obtener resultados más confiables. Cabe señalar que todas las series de datos homogenizadas para que puedan ser detectadas por R, la información debe estar ordenada en columnas de la siguiente forma: columna 1 (año), columna 2 (mes), columna 3 (temperatura máxima), columna 4 (temperatura mínima) y columna 5 (precipitación), columna 6, 7, 8 en caso de contar con más variables. Cada estación meteorológica deberá estar en formato .csv (archivo de valores separado por comas). Para el caso del SPI solo se utilizaron los datos mensuales de precipitación para el periodo de 1964-2016.

Una vez que se tienen las series de datos en orden (de manera ilustrativa se aplicara el cálculo de índices de sequía a la estación meteorológica 10048), se ejecuta el *software R* en su versión 3.6.1 (para el caso del cálculo de índices de sequía cualquier versión de R funciona); como primer paso se deberá cargar el paquete estadístico denominado SPEI (`> library (SPEI)`), se establecen los comandos siguientes para que la herramienta comience con el procedimiento de cálculo.

6.2.3.2. Comandos en R para el cálculo del SPI

a. Importar los datos de las series

Comando (`datos <- read.table('10048.csv',sep=';',head=TRUE)`): sirvió para transferir los datos de la estación climática a R, en este caso la estación 10048 (Figura 17).

```
> datos <- read.table('10048.csv', sep=';', head=TRUE)
> datos
  mes año tmax tmin precip
1   1 1964 36.6 -11.5  20.5
2   2 1964 27.4  -7.3   0.0
3   3 1964 25.2  -2.6   0.0
4   4 1964 28.8  -1.9   0.0
5   5 1964 28.3   1.5  46.3
6   6 1964 27.2   5.2 175.3
7   7 1964 27.6   6.2 130.2
8   8 1964 26.6   4.9 192.2
9   9 1964 26.7   4.5 276.7
10  10 1964 25.7  -0.9  50.1

↓ ↓ ↓
628  4 2016 30.0  -3.0   0.0
629  5 2016 31.0  -1.0  25.0
630  6 2016 29.0   4.0 107.9
631  7 2016 30.0   4.0 220.4
632  8 2016 24.0   8.0 405.9
633  9 2016 24.0   7.0 318.2
634 10 2016 24.2  -0.3  38.1
635 11 2016 24.7  -2.0   3.7
636 12 2016 23.0  -5.0  60.0
> |
```

Figura 17. Comando: importar datos a R

b. Comprobar datos

Comando (names (datos)): muestra los títulos de cada columna de la estación que se está trabajando y; comando (summary (datos)): arroja un resumen de estadística básica de los datos de las columnas, por ejemplo: el valor mínimo, máximo, media, mediana, etc. (Figura 18).

```
> names(datos)
[1] "mes"    "año"    "tmax"   "tmin"   "precip"
> summary(datos)
  mes      año      tmax      tmin      precip
Min.   : 1.00   Min.   :1964   Min.   :18.00   Min.   :-16.800   Min.   : 0.00
1st Qu.: 3.75   1st Qu.:1977   1st Qu.:23.70   1st Qu.: -7.000   1st Qu.: 0.00
Median : 6.50   Median :1990   Median :25.60   Median : -2.000   Median : 43.80
Mean   : 6.50   Mean   :1990   Mean   :25.84   Mean   : -1.938   Mean   : 81.88
3rd Qu.: 9.25   3rd Qu.:2003   3rd Qu.:28.00   3rd Qu.:  3.000   3rd Qu.:134.00
Max.   :12.00   Max.   :2016   Max.   :36.60   Max.   : 11.200   Max.   :580.90
```

Figura 18. Comandos para desplegar encabezado y estadísticas básicas.



c. Columnas

Comando (`datos$precip`): muestra de manera específica los datos de las columnas, para el caso del cálculo del SPI, como se muestra en la Figura 19 solo se ordena al programa mostrar los datos de precipitación.

```
> datos$precip
 [1] 20.5  0.0  0.0  0.0  46.3 175.3 130.2 192.2 276.7 50.1  7.6 49.3 34.9
[14] 27.4  0.0  0.0  0.0  70.1 331.8 260.4 192.8  15.0 23.8 127.7 56.3 33.8
[27]  0.0  5.3  58.8 103.9 180.9 446.9 157.7  92.6  17.5 54.0  29.8  8.8 20.0
[40]  0.0 35.1 154.0 274.2 445.7 120.2  40.1  0.0  12.5 36.3  72.6 202.8  0.0
[53]  8.8 61.3 386.8 200.3 324.2  25.0  87.6  90.1  15.0 37.6  0.0  0.0 15.0
[66] 76.4 240.4 187.8 150.2  88.9  6.6  93.9  81.4  76.4 40.1  0.0  0.0 127.7
[79] 250.4 222.8 409.4  0.0  8.8  0.0  0.0  0.0  0.0  0.0  57.6 145.2 179.0

      ↓      ↓      ↓      ↓      ↓      ↓      ↓      ↓      ↓      ↓      ↓
[521] 13.8 312.7 205.3 135.8 159.2  27.5  38.8  0.0  0.0  0.0  6.3  3.8 13.8
[534] 131.5 298.0 468.8 267.9  44.9  7.5  0.0  0.0  0.0 13.8  6.3  0.0 195.9
[547] 280.4 131.5 368.1 113.9  0.0  87.6  8.8 166.4 40.1  0.0  6.3  0.0 331.6
[560]  0.0 330.6  0.0  0.0  0.0  1.7  0.0  0.0  0.0  1.3 34.0 227.8 113.7
[573] 198.6 43.2  0.0 39.9  0.0  60.1  0.0  0.0 21.3 53.2 219.1 174.6  95.1
[586]  24.4  0.0  58.8 12.5  0.0  0.0  0.0  0.0  71.4 304.2 134.6 304.2  28.2
[599] 125.8 80.1  6.9  0.0  5.6  0.0  3.1 189.0 150.2 174.6 296.1 43.4 213.1
[612]  9.1  79.8 49.5 125.4 12.3  9.6 221.5 255.2  87.9 154.0 134.4  3.5 46.5
[625] 14.6  7.5  33.8  0.0  25.0 107.9 220.4 405.9 318.2  38.1  3.7  60.0
```

Figura 19. Comando: ver las columnas.

d. Calculo del SPI a escala temporal

Comando (`spi_12 <- spi(datos$precip,12)`): calcula el SPI a escalas diferentes ya sea 3, 6, 12, 18 meses de acuerdo al criterio del usuario (Figuras 20). En este caso se crea la variable `spi_12` donde se almacena el cálculo del índice SPI a 12 meses a partir de la precipitación (`spi_12 <- spi(datos$precip,12)`). El comando (`plot(spi_12)`): muestra los datos graficados de acuerdo a la intensidad de sequía presente en la estación (Figura 21).



```
> spi_10048 <- spi(datos$precip,12)
> spi_10048
```

	Jan	Feb	Mar	Apr	May	Jun
1	NA	NA	NA	NA	NA	NA
2	0.024626301	0.138602842	0.137470055	0.137466502	-0.025592229	-0.448111072
3	0.577063571	0.558367724	0.547667586	0.564864673	0.752461732	0.897192424
4	0.851822494	0.704245836	0.753114275	0.736551194	0.662421726	0.857364050
5	0.729140238	0.877962276	1.395336637	1.395413932	1.320969042	1.103072805
6	1.816583895	1.556232458	0.939199415	0.939247392	0.958211712	1.051391914
7	0.087565226	0.234567071	0.367518409	0.367529642	0.318219697	0.509683406
8	0.688195371	0.381221997	0.238471272	0.238474211	0.433969111	0.512441873
9	-0.215121082	-0.148067693	-0.142667833	-0.119421404	-0.238850959	-0.301163055
10	0.151029607	0.411313839	0.403965603	0.382942226	0.475508705	0.477864762

	Jul	Aug	Sep	Oct	Nov	Dec
1	NA	NA	NA	NA	NA	-0.060510022
2	0.309470351	0.552233757	0.242535591	0.113326576	0.174243317	0.486205858
3	0.371858110	1.018985671	0.883429230	1.139612898	1.179879368	0.946717932
4	1.095268255	1.162459103	1.018615878	0.853889304	0.835329702	0.700451224
5	1.371199748	0.669458274	1.311599138	1.273826702	1.626215620	1.910160248
6	0.545420173	0.519535858	-0.132334142	0.112197786	-0.224827076	-0.215958871
7	0.518879190	0.657977656	1.468031689	1.205669744	1.278656094	0.980034601
8	0.250775192	0.419256270	-0.519245307	-0.351242242	-0.422695654	-0.435083975
9	-0.554145167	-0.967541828	-0.933481399	-0.720929802	-0.183456064	0.125019428
10	0.814162556	1.234582038	1.454320397	1.372422945	0.999661537	0.767971305

Figura 20. Comando: Calculo del SPI para la Estación 10048.

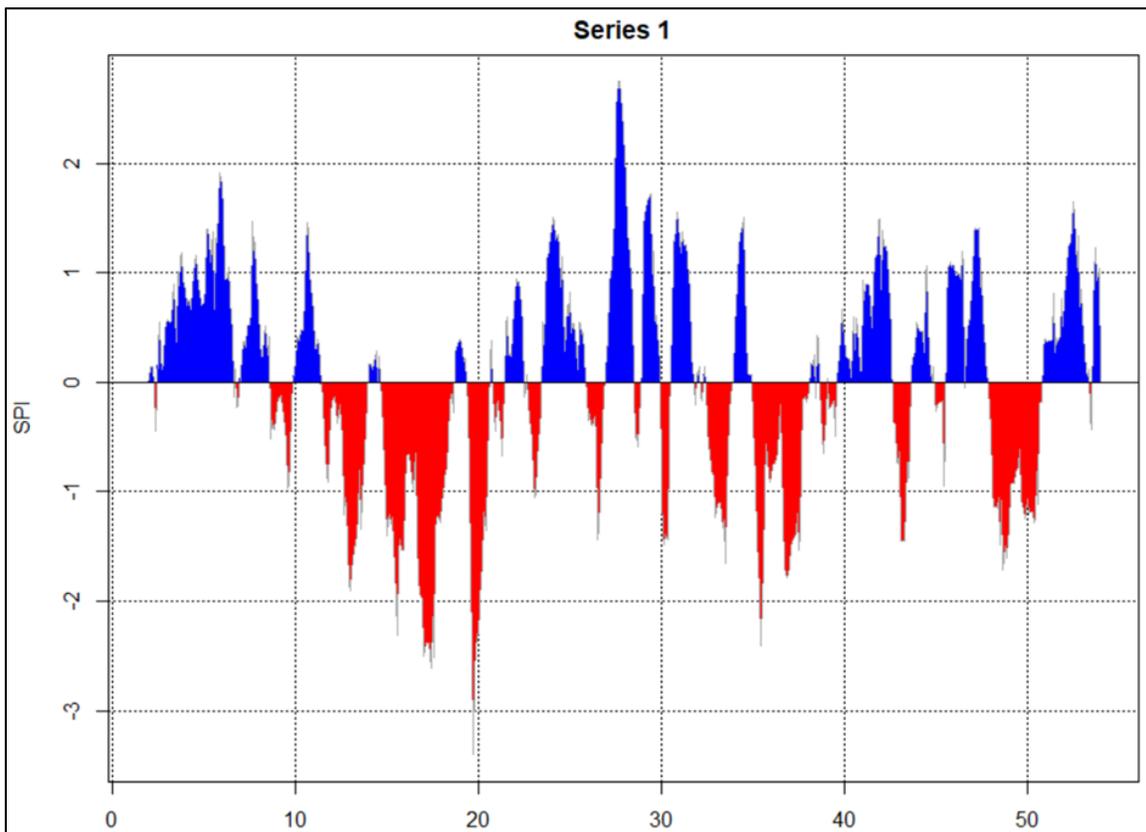


Figura 21. Comando: grafica de datos del SPI de la estación 10048.



e. Comprobar los objetos de SPI 6, 12 18, 24 meses

Comando (Names (spi_12)): después del cálculo del SPI, esta opción muestra los títulos de las estadísticas del cálculo: llamar, filtros, coeficientes, distribución, entre otros (Figura 22). Para mostrar el contenido estadístico de los títulos antes mencionados, escribir el nombre del comando del título más el nombre que se le asignó al cálculo del SPI, ejemplo: *coefficients* (spi_12) (Figura 23) y; comando (summary(spi_10048)): arroja en forma de resumen el contenido estadístico (Figura 24).

```
> names(spi_10048)
[1] "call"          "fitted"        "coefficients"  "scale"         "kernel"
[6] "distribution"  "fit"           "na.action"
```

Figura 22. Comando: muestra el nombre de las estadísticas que contiene el cálculo.

```
> coefficients(spi_10048)
, , 1                , , 5                , , 9
par      Series 1    par      Series 1    par      Series 1
alpha 15.45792      alpha 11.95761      alpha 13.660902
beta  5.26989      beta  6.81521      beta  5.998074
, , 2                , , 6                , , 10
par      Series 1    par      Series 1    par      Series 1
alpha 12.555718    alpha 13.235306    alpha 13.849780
beta  6.488961    beta  6.149127    beta  5.914886
, , 3                , , 7                , , 11
par      Series 1    par      Series 1    par      Series 1
alpha 11.997707    alpha 11.875448    alpha 15.65250
beta  6.795275    beta  6.865436    beta  5.23326
, , 4                , , 8                , , 12
par      Series 1    par      Series 1    par      Series 1
alpha 11.999243    alpha 14.283513    alpha 16.411915
beta  6.794406    beta  5.731965    beta  4.988802
```

Figura 23. Comando: contenido de los coeficientes del SPI.

```
> summary(spi_10048)
Call:
spi(data = datos$precip, scale = 12)

Coefficients:
  Series 1:
   alpha   beta
1  15.45792  5.269890
2  12.55572  6.488961
3  11.99771  6.795275
4  11.99924  6.794406
5  11.95761  6.815210
6  13.23531  6.149127
7  11.87545  6.865436
8  14.28351  5.731965
9  13.66090  5.998074
10 13.84978  5.914886
11 15.65250  5.233260
12 16.41191  4.988802
```

Figura 24. Comando: resumen de los coeficientes estadísticas

f. Seleccionar datos del SPI y guardar archivo:

Comando (`spi12 <- spi_12$fitted`): se seleccionan los resultados del SPI por medio de un filtro; comando (`summary (spi12)`): presenta el resumen de los datos del SPI y; finalmente, comando (`write.table (spi12,'spi12.csv',sep=';',row.names=FALSE)`): guarda los valores del SPI en un documento en formato .csv.

6.2.3.3. Cálculo del Índice Estandarizado de Precipitación Evapotranspiración (SPEI)

Vicente-Serrano *et. al.* (2010) menciona que los usos de los índices de sequía deben incluir datos de temperatura en su planteamiento, sobre todo cuando en la aplicación se involucren escenarios climáticos. El índice de sequía multiescalar simple (SPEI) combina los datos de precipitación y temperatura; del mismo modo combina la sensibilidad del Índice de Sequía de Palmer (PDSI) y los cambios en la demanda de evaporación. Este índice es adecuado para detectar, monitorear y explorar las consecuencias del calentamiento global en condiciones de sequía.



A continuación, se describe el cálculo del SPEI por medio de comandos desarrollados en R, utilizando el mismo procedimiento para el cálculo del SPI. El primer paso es el cálculo de la evapotranspiración potencial.

a. Importar los datos de las series para cálculo de la ETP

Comando (`datos <- read.table('10048.csv',sep=';',head=TRUE)`): transfiere los datos de la estación climática a R, en este caso se siguió trabajando en la estación 10048.

6.2.3.4. Cálculo de la evapotranspiración potencial (ETP)

Comando (`datos$PET_har_10048 <- hargreaves (Tmin=datos $tmin,Tmax = datos $tmax,lat=23)`): utilizando para el cálculo de la ETP se aplicó el método de Hargreaves, debido a que solo se cuentan con datos de temperatura mínima y máxima mensual. Otro valor que es requerido es la latitud de las estaciones (Figura 25); comando (`names(datos)`): muestra los nombres de las columnas de cada estación, en este caso incluye ya el cálculo de la ETP calculada (Figura 26); comando (`plot(datos$PET_har_10047)`): presenta la gráfica de los datos de la ETP (Figura 27) y, comando (`write.table (datos$ PET_har_10048,"metodo _har_ 10048 .csv ",sep=";")`): guarda los valores de ETP en formato .csv.

```
> datos$PET_har_10048 <- hargreaves(Tmin=datos$tmin, Tmax=datos$tmax, lat=23)
> datos$PET_har_10048
```

	Jan	Feb	Mar	Apr	May	Jun	Jul	Aug	Sep	Oct	Nov	Dec
1	153.88342	127.22263	152.22409	184.81234	195.51495	180.19729	185.55204	173.68120	155.16680	137.21929	105.04278	115.68233
2	93.65495	94.45614	144.92329	179.39369	214.27182	212.06772	181.76245	172.94781	161.10628	127.27529	124.89982	100.64056
3	92.87794	101.95088	147.22355	190.50276	236.35557	203.84582	211.21898	167.95025	147.99509	128.15022	108.93869	99.28287
4	102.56545	111.92317	160.25803	177.21057	216.00812	188.20993	168.11262	159.17567	128.58146	123.57574	108.43185	91.92616
5	102.41544	115.70193	163.57498	178.78038	202.67903	197.31084	158.81543	171.49067	153.42639	145.06848	124.09735	103.53017
6	124.52807	110.31615	160.33865	195.84535	215.62497	243.54023	203.51495	184.83390	168.70270	146.30667	116.15341	100.74192
7	91.01728	114.43946	156.42513	196.64033	208.87717	215.24819	204.65884	182.14834	152.08072	146.87879	128.51555	115.47566
8	121.02939	131.54305	164.08997	183.97675	209.65055	191.67592	181.63162	156.99188	143.58086	126.48196	109.04675	98.80431
9	109.69862	103.58351	151.69820	196.10604	208.26358	206.21529	185.55204	167.10408	143.58086	137.56095	109.04675	93.37505
10	90.30675	115.94288	136.53905	161.41837	221.92980	215.24819	169.57600	154.02076	148.23814	136.02108	112.94425	91.34819
↓	↓	↓	↓	↓	↓	↓	↓	↓	↓	↓	↓	↓
43	101.81172	125.70678	140.20010	187.92450	203.86384	203.28266	182.96049	168.48588	146.02291	132.22124	142.86414	97.48244
44	95.30116	112.83989	164.75231	161.25919	182.12103	203.28266	183.25566	166.13973	110.98466	124.77345	96.08354	97.48244
45	106.69776	120.66025	138.85489	162.66093	200.45536	209.18730	190.71302	162.82598	110.98466	108.67525	92.45643	94.01277
46	122.77008	113.83344	151.04887	173.95683	167.83069	200.67001	199.95984	179.56597	137.27292	147.86038	91.43635	94.95927
47	118.85132	113.55625	140.51502	156.74400	193.84260	201.38819	170.66516	167.68212	144.63210	128.61431	107.02450	100.98973
48	104.99233	116.35913	159.14234	188.37997	214.20052	212.93682	191.85078	180.26425	150.48304	146.65906	114.85856	98.37859
49	106.25224	134.75043	167.24735	197.91483	220.89105	215.37628	205.11399	172.14597	148.77576	143.28266	127.34219	98.41345
50	98.24464	117.56667	159.53429	185.01775	214.13611	214.79873	190.14609	189.45902	140.22258	133.46889	103.28254	91.34865
51	99.36163	118.80611	151.05855	172.44125	194.85727	200.11713	178.54772	166.98378	140.22602	133.46889	100.93403	96.60471
52	95.30116	114.00820	135.57807	185.78530	207.70559	189.73715	199.52096	176.18075	157.46499	131.40318	127.21731	94.67150
53	98.42661	128.77690	156.02270	191.91683	214.29580	193.78588	205.11399	150.24745	135.37689	129.72911	110.08820	98.54022

Figura 25. Cálculo de la evapotranspiración potencial.

```
> names(datos)
[1] "mes"      "año"      "tmax"     "tmin"     "precip"
[6] "PET_har_10048"
```

Figura 26. Nombre de las columnas de la estación 10048.

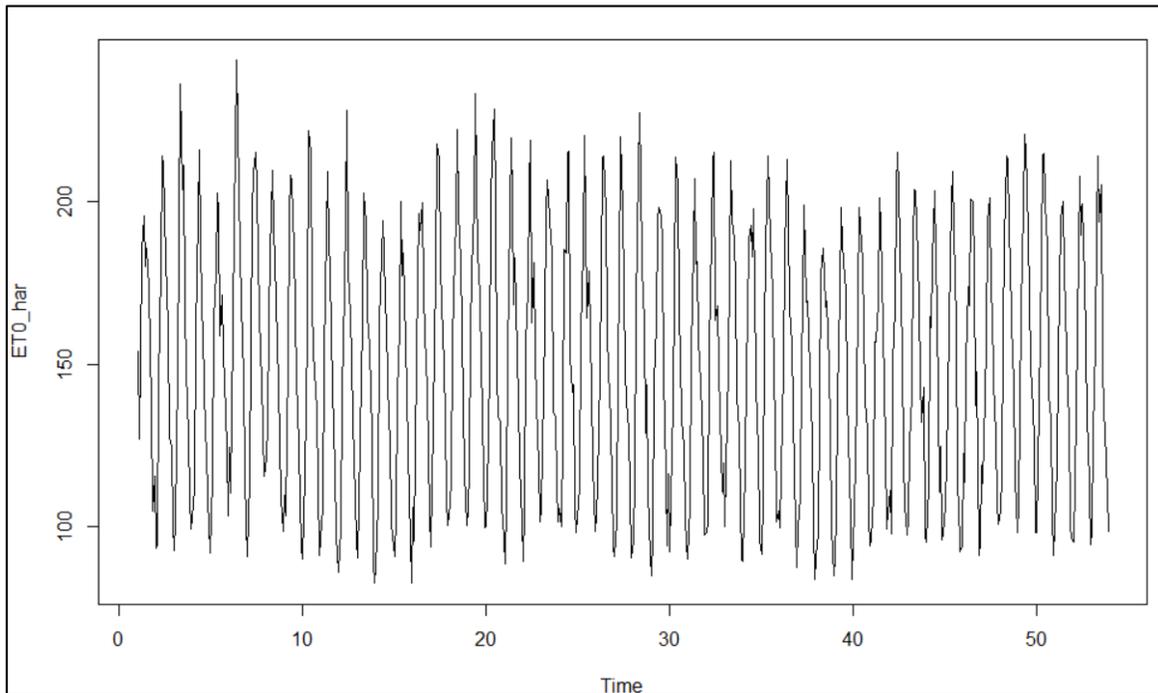


Figura 27. Grafica de los datos de la ETP de la estación 10048.

6.2.3.5. Cálculo del SPEI

Comando (`spi10048 <- spei(data=ts(datos$precip- datos$PET_har_10048, freq=12,start=c(1961,1)), scale=12, ref.start=c(1964,1), ref.end=c(2016,12))`): se calculó el SPEI, fue necesario como datos de entrada la precipitación mensual, la ETP, así mismo se indicó el periodo de referencia, es decir, el inicio y final de años que se desea calcular, que para el caso de este estudio fue el mismo que del SPI (1964-2016) (Figuras 28); comando (`exportar <- spi10048$fitted`): especifica la información que desea mostrar; comando (`plot(spi10048)`): muestra los datos del SPEI graficados (Figura 29) y; comando (`write.table(exportar,"spei12_10047.csv",sep=";")`): guarda los valores del SPEI en un documento en formato .csv.



```
> spii0048 <- spei(data=ts(datos$precip-datos$PET_har_10048,freq=12,start=c(1961,1))$
+ ref.start=c(1964,1), ref.end=c(2016,12))
> spii0048
```

	Jan	Feb	Mar	Apr	May	Jun
1961	NA	NA	NA	NA	NA	NA
1962	-0.153681271	0.104312234	0.138814708	0.164803920	-0.059112499	-0.573527353
1963	0.433174200	0.400371938	0.392196664	0.376221026	0.503894389	0.685882375
1964	0.582658816	0.410039145	0.434097667	0.465532849	0.455329702	0.718449611
1965	0.885231314	1.003828636	1.512205702	1.494893609	1.441511660	1.227903180
1966	1.692413291	1.425352723	0.772690262	0.715985093	0.690866590	0.626888795
1967	-0.610895948	-0.410572579	-0.235533663	-0.229431087	-0.248615295	0.036508891
1968	-0.003471006	-0.325120632	-0.476587271	-0.422756759	-0.211528659	-0.069124195
1969	-0.391911279	-0.203983881	-0.144365777	-0.156649010	-0.257687190	-0.369432663
1970	0.031756921	0.275138029	0.332604799	0.436452617	0.485437362	0.466849438
1971	0.663744144	0.351117456	0.297658534	0.352275160	0.347012195	0.089628991
1972	0.126178822	0.156223778	0.199871356	0.117162370	0.035373419	0.058467843
	Jul	Aug	Sep	Oct	Nov	Dec
1961	NA	NA	NA	NA	NA	-0.457083169
1962	0.232943077	0.468799764	0.160163669	0.038008685	0.024901409	0.357705915
1963	0.076458731	0.755690438	0.686265644	0.942319828	1.029057588	0.741973245
1964	1.106886211	1.239279471	1.148399056	1.012706941	1.011236624	0.870028029
1965	1.469021392	0.823846806	1.356433771	1.278328929	1.558622147	1.798474975
1966	-0.021049375	-0.180034653	-0.879014626	-0.661872072	-0.997233248	-1.008588125
1967	0.116823865	0.220807976	1.175680154	0.906700125	0.922756286	0.473585767
1968	-0.186036159	0.028247892	-0.843000674	-0.629457759	-0.627196228	-0.613077620
1969	-0.565472222	-0.960086912	-0.941096638	-0.818511667	-0.320796637	-0.042960652
1970	0.883337233	1.370486329	1.518591443	1.479531657	1.128228030	0.872497794
1971	-0.019219568	-0.402195904	-0.421072165	-0.545597325	-0.515704010	0.031911817
1972	-0.054626925	-0.186101753	-0.873644438	-0.815773249	-0.915414218	-1.434409193

Figura 28. Resultados del SPEI de la estación 10048.

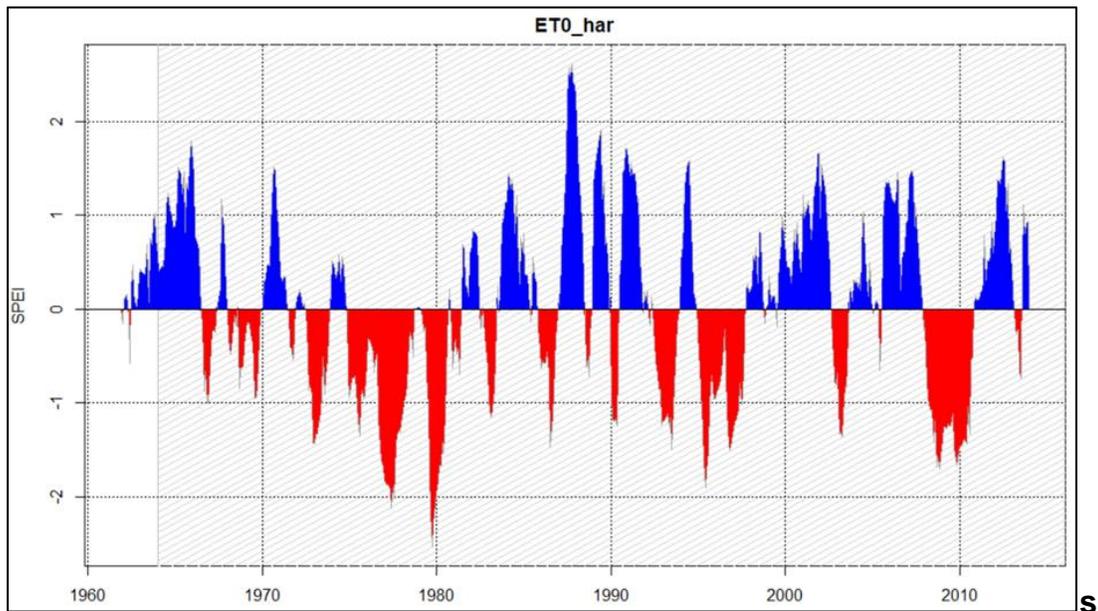


Figura 29. Grafica de los valores del SPEI de la estación 10048.

7. ANÁLISIS DE RESULTADOS

7.1. Resultados de la elaboración del mapa base

La cuenca del río Nazas se delimitó de acuerdo con la red de drenaje presente en el área de estudio, en el Cuadro 13 se presentan las características generales de la cuenca (Figura 30).

Cuadro 13. Características generales de la cuenca del río Nazas.

Subcuenca	Área (Km ²)	Perímetro (km)	Superficie en porcentaje (%)
Presa Lázaro Cárdenas	17,663.54	952.76	36.22
Río Nazas-Rodeo	19,427.93	586.81	39.84
Río Nazas-Torreón	11,670.30	764.78	23.94
Total	4,8761.77	2,304.36	100

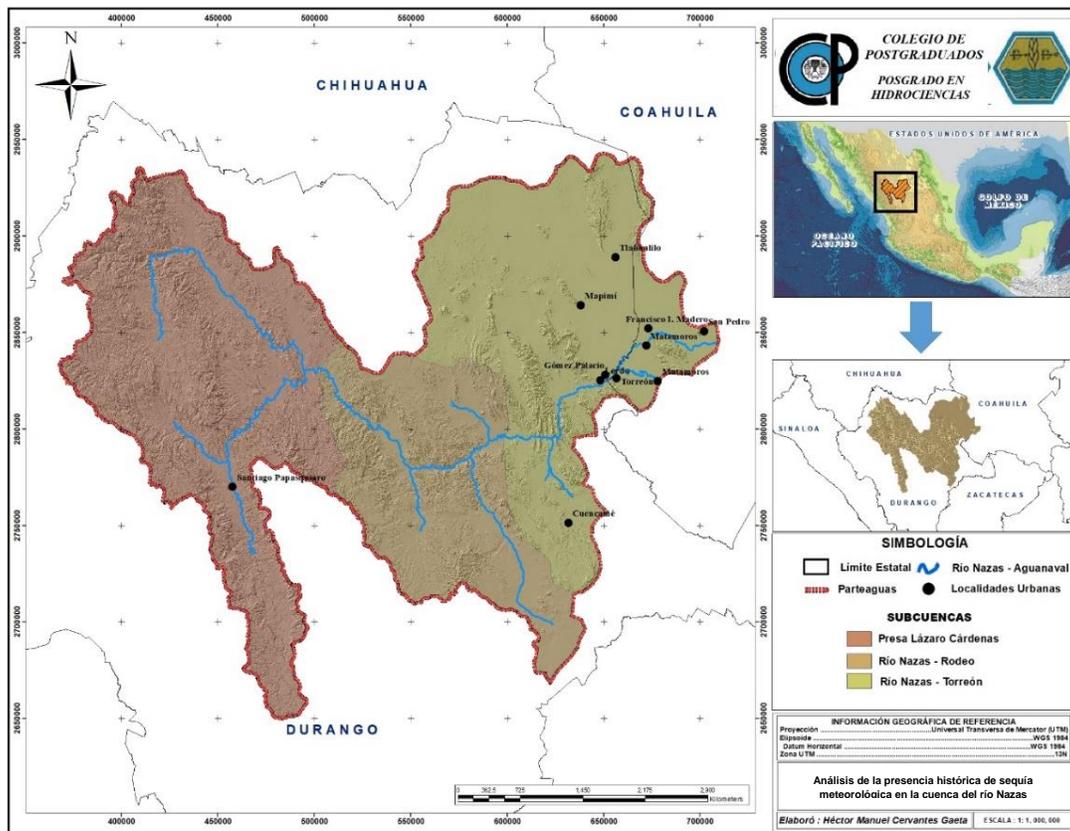


Figura 30. Delimitación de las subcuencas en el río Nazas.

En el Cuadro 14 se presenta la longitud total del río Nazas, así como también la longitud que corresponde a cada subcuenca.

Cuadro 14. Sistema de drenaje de la cuenca del río Nazas.

Subcuenca	Longitud del río Nazas (km)	Porcentaje respecto al río Nazas (%)
Presa Lázaro Cárdenas	220.73	38.73
Río Nazas-Rodeo	167.10	29.36
Río Nazas-Torreón	181.35	31.82
Total	569.81	100

7.1.1. Relieve de la cuenca del río Nazas

Con base en el sistema de topofomas, la cuenca del río Nazas presenta distintas características, mostrando un mayor dominio en la superficie, las zonas de lomeríos con mesetas, mesetas con cañadas y llanuras aluviales, teniendo una altitud máxima de 3,182 m. y una mínima de 1,070 m. En el Cuadro 15 se muestran algunos parámetros relacionados con el relieve de la cuenca.

Cuadro 15. Parámetros de relieve en la cuenca del río Nazas.

Cuenca	Parámetros		
	Altura media de la cuenca (m)	Pendiente media de la cuenca (%)	Pendiente media del cauce principal (%)
Río Nazas	1795	19.12	12.6

7.2. Resultados del análisis de la información meteorológica

7.2.1. Estaciones climatológicas

Para la elaboración del presente estudio se utilizó la información registrada en estaciones climatológicas, realizando el acopio de variables representativas como la precipitación total mensual (pp), temperatura máxima (tx) y temperatura mínima



(tn) mensual en un total de 61 estaciones. Las variables antes mencionadas cuentan con registros de estaciones climatológicas administradas por el Servicio Meteorológico Nacional (SMN) y la Comisión Nacional del Agua (CONAGUA). Se encontraron dentro del área de estudio estaciones climatológicas suspendidas por el SMN y estaciones en operación por la CONAGUA, que cuentan con datos del periodo 1922 – 2017.

Las estaciones climatológicas que se emplean en el estudio se seleccionaron con base en su distribución espacial y con distintas condiciones de altitud, las cuales van desde los 1,070 m hasta los 3,182 m. Estas estaciones se encuentran ubicadas en dos tipos de climas principalmente, BS 1kw (w) semiseco templado y BW hw (W) muy seco semicálido. La cuenca se caracteriza por tener un relieve heterogéneo, el cual que va desde las llanuras aluviales, llanuras desérticas y bajadas con lomeríos, hasta tener sierras altas con lomeríos, mesetas con cañadas y sierras complejas.

7.2.2. Análisis de variables climatológicas

El análisis de la información climatológica consistió en realizar la homogenización de las series climáticas, con el propósito de crear una base de datos más confiable para alcanzar los objetivos de esta investigación, tal como señala Marcolini *et. al.*, (2019) que para la evaluación de las series climáticas las pruebas de homogeneidad han tenido un papel importante dentro de los estudios de cambio climático, siendo así que la gran mayoría de los algoritmos de homogenización han sido desarrollados y aplicados para series de precipitación y temperatura, teniendo como objetivo la detección que puntos de ruptura y ajuste de las series.

El análisis de las series climáticas se desarrolló en tres etapas: calidad de datos, comparación de series y complemento de valores faltantes y/o perdidos mediante el *script HOMER.R* propuesto por Mestre *et. al.*, (2012) en (*The R Project for Statistical Computing*) en su versión 2.15.2.

7.2.3. Resultados del control de calidad de datos climáticos



Las tres variables de estudio, precipitación mensual, temperatura máxima y mínima mensual (pp, tn y tx) de las 61 estaciones climatológicas fueron sometidas a un control de calidad; en el que estas variables fueron analizadas de forma visual, se eliminaron todos los *outliers* o valores atípicos, es decir, aquellos datos que mostraron valores muy altos o muy bajos y no siguen una tendencia con respecto a los datos que se están analizando, esto dentro de las series climáticas, (Figura 31), con el propósito de mostrar una buena consistencia en todos los datos.

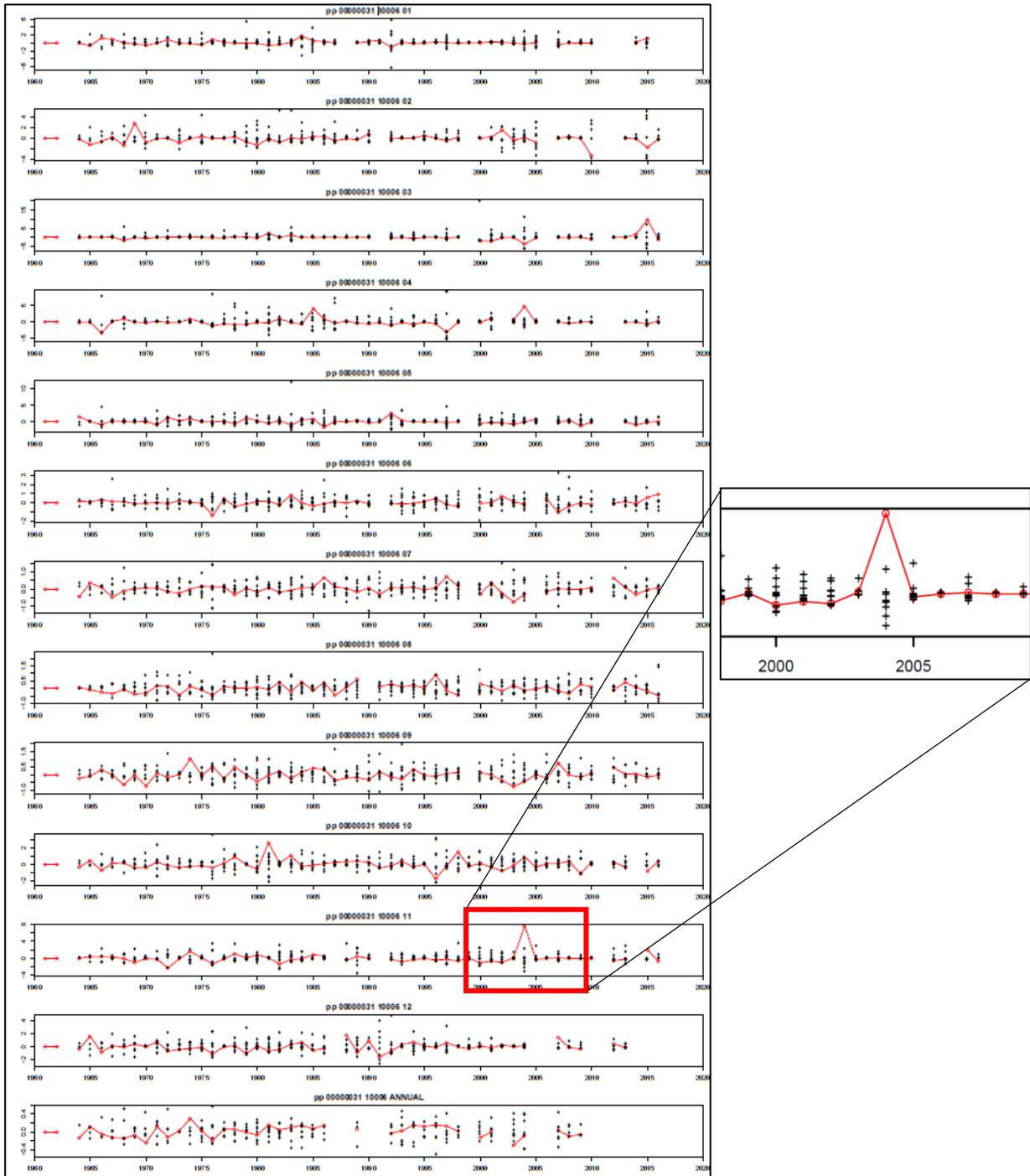


Figura 31. Valores atípicos (*Outliers*) en la precipitación mensual de la estación climatológica 10006.



7.2.4. Resultados de la detección emparejada y detección conjunta

Después de eliminar los valores atípicos se le realizó una detección emparejada y detección conjunta donde se identificaron y corrigieron las no homogeneidades presentes. En este procedimiento, se llevó a cabo la identificación de las interrupciones mediante la detección por pares, la cual consistió en la estimación de los puntos de cambio que hay entre una estación candidata y una de referencia. Posteriormente, la detección conjunta se aplicó solo para ubicar que los puntos de cambio o rupturas fueran correctos, es decir, cada variable (pp, tn y tx) de una estación candidata, se comparó con otras diez estaciones climatológicas vecinas con las que presentó una mayor correlación.

Por lo tanto, de la homogeneización de la variable de precipitación mensual sólo se obtuvieron 25 estaciones (Cuadro 16), las cuales equivalen únicamente al 42% del total de estaciones consideradas y analizadas inicialmente (61 estaciones climatológicas).

Cuadro 16. Homogeneización de la variable precipitación mensual.

Id	Clave	Estación	Periodo		No. de años de registro
1	10078	Sardinas, San Bernardo	1970	2008	39
2	10029	Guanaceví (Smn), Guanace	1922	2008	88
3	10028	El Cuarto, San Juan Del	1948	2008	61
4	10004	Cañón Fernández, Cuenca	1944	2009	66
5	10008	Cinco De Mayo, San Pedro	1965	2009	45
6	10074	Santa Clara, Santa Clara	1964	2009	46
7	10006	Cendradillas, Guanacevi	1961	2016	56
8	10037	La Huerta, Topia	1969	2015	47
9	10087	Vascogil, Canelas	1967	2016	50
10	10018	El Cantil, Santiago Papa	1953	2016	64
11	10121	Los Altares, Santiago Pa	1973	2016	44
12	10031	Huahuapan, San Dimas	1966	2016	51
13	10093	El Salto (Dge), Pueblo N	1964	2016	53
14	10048	Navios Viejos, Durango	1964	2016	53
15	10051	Otinapa, Durango	1964	2016	53
16	10023	El Pueblito, Durango	1964	2016	53



Id	Clave	Estación	Periodo		No. de años de registro
17	10076	Santiago Bayacora, Durango	1964	2016	53
18	10090	Canatlán (Dge), Canatlán	1964	2016	53
19	10016	Chinacates, Santiago Pap	1964	2016	53
20	10129	Coneto De Comonfort, Con	1977	2016	40
21	10030	Guadalupe Victoria (Dge	1964	2016	53
22	10047	Narciso Mendoza, Poanas	1964	2016	53
23	32028	Juan Aldama, Juan Aldama	1964	2016	53
24	10049	Nazas, Nazas	1966	2012	47
25	10131	Peñón Blanco (Dge)	1977	2017	41

Para la variable temperatura mínima mensual se obtuvieron 17 estaciones, que equivale a un 28% del total de estaciones analizadas inicialmente. En el Cuadro 17 se presentan los resultados de la homogenización de dicha variable.

Cuadro 17. Homogenización de la variable temperatura mínima mensual.

Id	Clave	Estación	Periodo		No. de años de registro
1	10078	Sardinas, San Bernardo	1970	2008	39
2	10029	Guanaceví (Smn), Guanace	1922	2008	88
3	10138	San Bernardo, San Bernardo	1978	2017	40
4	10004	Cañón Fernández, Cuenca	1944	2009	66
5	10006	Cendradillas, Guanacevi	1961	2016	56
6	10141	Canutillo, Ocampo	1980	2008	37
7	10087	Vascogil, Canelas	1967	2016	50
8	10051	Otinapa, Durango	1964	2016	53
9	10023	El Pueblito, Durango	1964	2016	53
10	10076	Santiago Bayacora, Durango	1964	2016	53
11	10090	Canatlan (Dge), Canatlan	1964	2016	53
12	10129	Coneto De Comonfort, Con	1977	2016	40
13	10047	Narciso Mendoza, Poanas	1964	2016	53
14	32028	Juan Aldama, Juan Aldama	1964	2016	53
15	10049	Nazas, Nazas	1966	2012	47
16	5036	San Pedro, San Pedro	1964	2016	53
17	10131	Peñón Blanco (Dge)	1977	2017	41

En cuanto a la variable temperatura máxima mensual se obtuvieron 24 estaciones, dando un 39 % del total de estaciones analizadas inicialmente. En el Cuadro 18 se muestran los resultados de la homogenización de dicha variable.

Cuadro 18. Homogenización de la variable temperatura máxima mensual.

Id	Clave	Estación	Periodo		No. de años de registro
1	10078	Sardinas, San Bernardo	1970	2008	39
2	10029	Guanaceví (Smn), Guanace	1922	2008	88
3	10138	San Bernardo, San Bernardo	1978	2017	40
4	10021	El Palmito, Indé	1973	2016	44
5	10098	Rodeo (Dge), Rodeo	1945	2008	64
6	10085	Tlahualilo, Tlahualilo	1964	2008	45
7	10074	Santa Clara, Santa Clara	1964	2009	46
8	10006	Cendradillas, Guanacevi	1961	2016	56
9	10087	Vascogil, Canelas	1967	2016	50
10	10093	El Salto (Dge), Pueblo N	1964	2016	53
11	10051	Otinapa, Durango	1964	2016	53
12	10023	El Pueblito, Durango	1964	2016	53
13	10090	Canatlan (Dge), Canatlan	1964	2016	53
14	10016	Chinacates, Santiago Pap	1964	2016	53
15	10129	Coneto De Comonfort, Con	1977	2016	40
16	10030	Guadalupe Victoria (Dge)	1964	2016	53
17	10047	Narciso Mendoza, Poanas	1964	2016	53
18	32028	Juan Aldama, Juan Aldama	1964	2016	53
19	10055	Pedriceña, Cuencame	1942	2016	75
20	10049	Nazas, Nazas	1966	2012	47
21	5139	Emiliano Zapata, Viesca	1979	2016	38
22	5036	San Pedro, San Pedro	1964	2016	53
23	10045	Mapimí, Mapimí	1964	2012	49
24	10131	Peñón Blanco (Dge)	1977	2017	41

7.2.5. Resultados de la corrección y datos faltantes

De acuerdo con la Organización Mundial de Meteorología (WMO, 2011), los datos faltantes en las series climáticas se pueden completar con interpolaciones temporales, utilizando datos de las mismas series, o con interpolaciones espaciales de estaciones cercanas. En este estudio, se realizó mediante el método el vecino

más cercano, probado por Vicente-Serrano *et al.* (2010), teniendo como resultado final el llenado de los valores faltantes, en todas las series climáticas mediante el modelo ANOVA.

7.3. Resultados del cálculo de los índices de sequía

7.3.1. Selección del periodo de evaluación (1964-2016)

De acuerdo con el procedimiento para el cálculo de los índices de sequía se requiere tener un periodo de referencia y evaluación, por lo que después de haber sometido la información a un control de calidad, reconstrucción de datos y homogenización a las series de precipitación y temperatura, se procedió a realizarlo. Uno de los criterios que se tomó en cuenta fue tener estaciones climáticas con datos mayores a 30 años, que coincidieran con un periodo determinado.

Es así que, de la selección se obtuvo lo siguiente de cada variable a nivel mensual: precipitación (pp) 12 estaciones, temperatura mínima (tn) 8 estaciones y temperatura máxima (tx) 11 estaciones. Para determinar el periodo de referencia se utilizó el método denominado el vecino más cercano probado por Vicente-Serrano *et al.*, (2010), y de esta manera se completaron las estaciones de cada variable Finalmente se seleccionaron 14 estaciones climatológicas para un periodo de evaluación de 53 años de 1964 a 2016 (Cuadro 19). En la Figura 32 se presenta la distribución de las antes mencionadas en la cuenca del río Nazas.

Cuadro 19. Estaciones climatológicas finales (1964-2016).

Id.	Clave	Estación	Periodo		No. de años de registro
1	10006	Cendradillas, Guanacevi	1964	2016	53
2	32038	Juan Aldama, Juan Aldama	1964	2016	53
3	10047	Narciso Mendoza, Poanas	1964	2016	53
4	10023	El Pueblito, Durango	1964	2016	53
Id	Clave	Estación	Periodo		No. de años de registro

5	10051	Otinapa, Durango	1964	2016	53
6	10090	Canatlan (Dge), Canatlan	1964	2016	53
7	10093	El Salto (Dge), Pueblo N	1964	2016	53
8	10076	Santiago Bayacora, Durango	1964	2016	53
9	10030	Guadalupe Victoria (Dge)	1964	2016	53
10	10016	Chinacates, Santiago Pap	1964	2016	53
11	5036	San Pedro, San Pedro	1964	2016	53
12	10018	El Cantil, Santiago Papa	1964	2016	53
13	10048	Navios Viejos, Durango	1964	2016	53
14	10055	Pedriceña, Cuencame	1964	2016	53

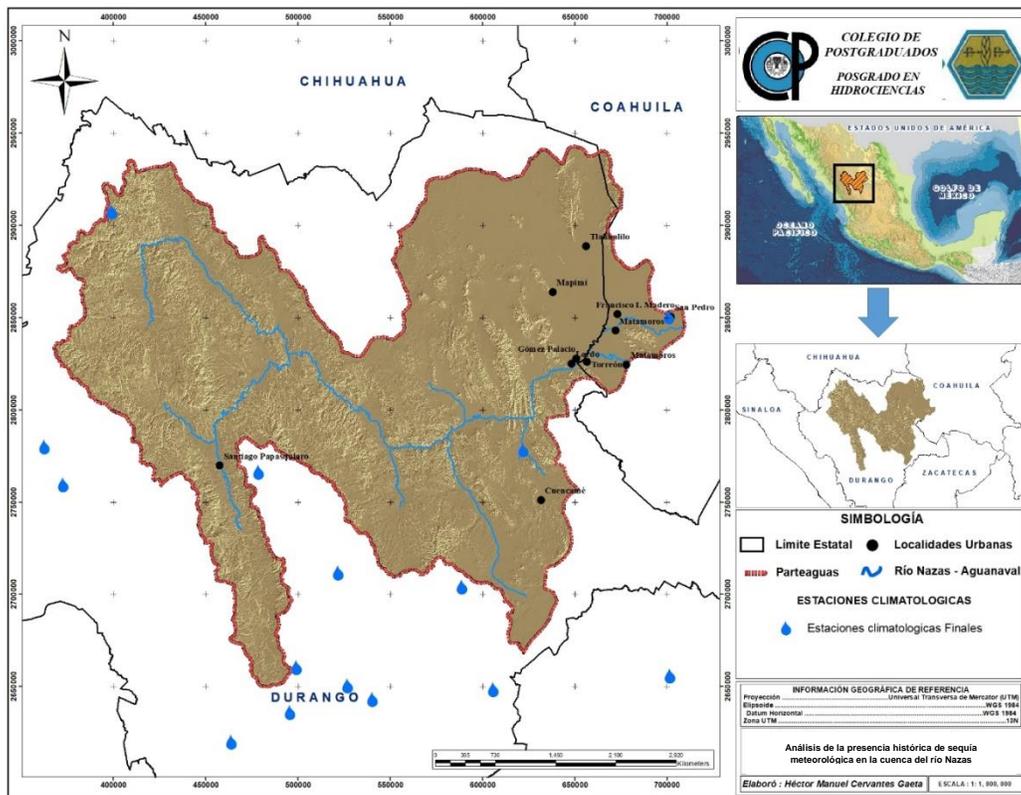


Figura 32. Localización de las estaciones climatológicas (1964-2016).

Mediante este proceso, se identificó que la aceptabilidad de los resultados/valores de salida fue positiva, lo que coincide con los resultados en otras regiones del mundo, como México (Serrano et al., 2016), Francia y España (Pérez et al., 2015), Portugal (Freitas et al., 2013), Italia (Arruffo y Di Calro, 2019), Irlanda (Coll et al.,



2014) y (Noone et al., 2015), Austria (Marcolini et al., 2019), Ecuador (Vicente-Serrano et al., 2017), Bolivia y Perú (López-Moreno et al., 2016).

7.3.2. Indicadores de sequía: SPI y SPEI

A continuación, se presentan los resultados del periodo de evaluación de sequía meteorológica de 1964-2016, en la cuenca del río Nazas con los indicadores de sequía: Índice Estandarizado de Precipitación (SPI) e Índice Estandarizado de Precipitación-Evapotranspiración (SPEI), en dos escalas temporales de 6 y 12 meses.

Los indicadores de sequía se analizaron con base en los valores de intensidad propuestos por Mckee *et al.*, (1993), donde se clasifican en 7 categorías, desde extremadamente húmedo hasta extremadamente seco. En lo que respecta a los índices para el caso de la estación climatológica 5036, el SPI con un 64.5% y el SPEI con un 62.5% tienen una tendencia en la categoría cercano a lo normal. La categoría moderadamente a extremadamente seco corresponde al 17.5% y 20% respectivamente. La ocurrencia en periodos húmedos va del 18% al 17.5 %. Por otro lado, se muestra que se presentaron al menos siete periodos dentro de la categoría moderadamente seco en los años: 1965-1966, 1970-1971, 1974-1975, 1979-1980, 1982, 1994-1996 y 2012-2013; dentro de la categoría severamente seco se presentaron cinco periodos: 1977-1978, 1989, 1998, 2005-2006 y 2010-2012. Es importante señalar que los resultados mostraron que el SPI y el SPEI, en esta estación, tuvieron valores muy similares (Figura 33).

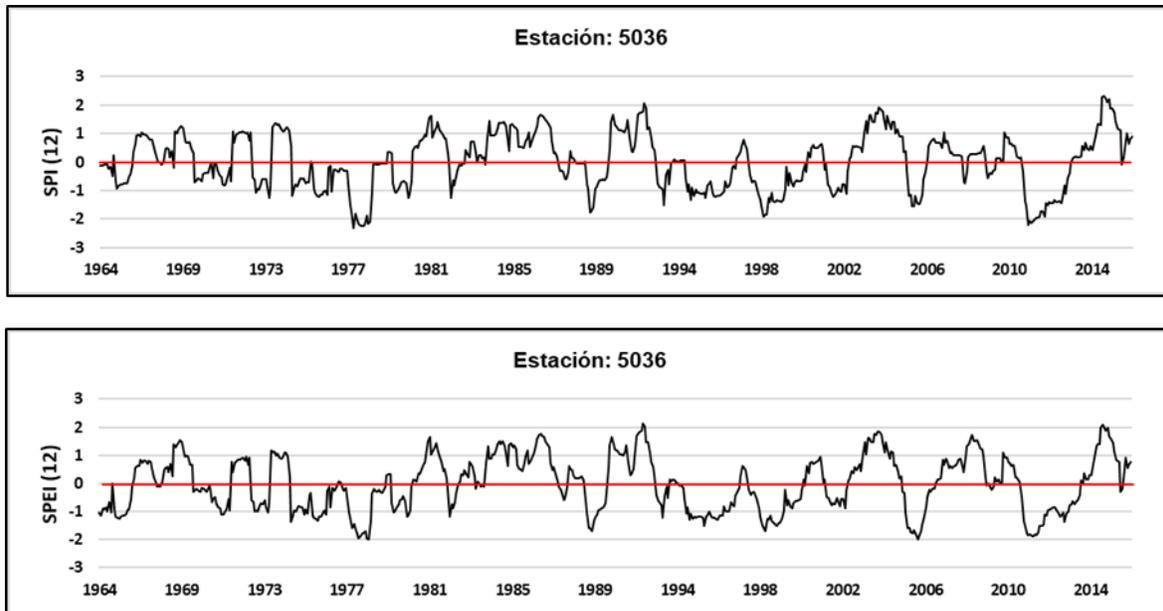


Figura 33. Estación 5036, SPI y SPEI con escala temporal 12 meses.

En la estación climatológica 10006, en lo que respecta a los índices, el SPI con un 68.5% y el SPEI con un 66% tienen una tendencia en la categoría Cercano a lo normal. La categoría moderadamente a extremadamente seco corresponde al 12.5% y 15% respectivamente. La ocurrencia de periodos húmedos está en 19% en ambos índices. Por otro lado, el SPI presentó ocho periodos muy cortos dentro de la categoría moderadamente seco en los años: 1965, 1967, 1973, 1978, 1985, 2004, 2006 y 2008; dentro de la categoría severamente seco para SPI se presentaron nueve periodos: 1964-1965, 1968, 1983, 1992, 1995, 1998, 2000-2002, 2003 y 2006, y finalmente solo en dos ocasiones se presentaron sequías a nivel extremo, en los años 1972-1973 y 2014. En cuanto al SPEI, coincide con la gran mayoría de los periodos antes descritos, pero a diferencia es que en algunos periodos la intensidad fue mayor y con periodos más prolongados y en otros solo fue una menor intensidad, por ejemplo, en 1967-1969 se presentó una sequía moderada a extremadamente seco (Figura 34).

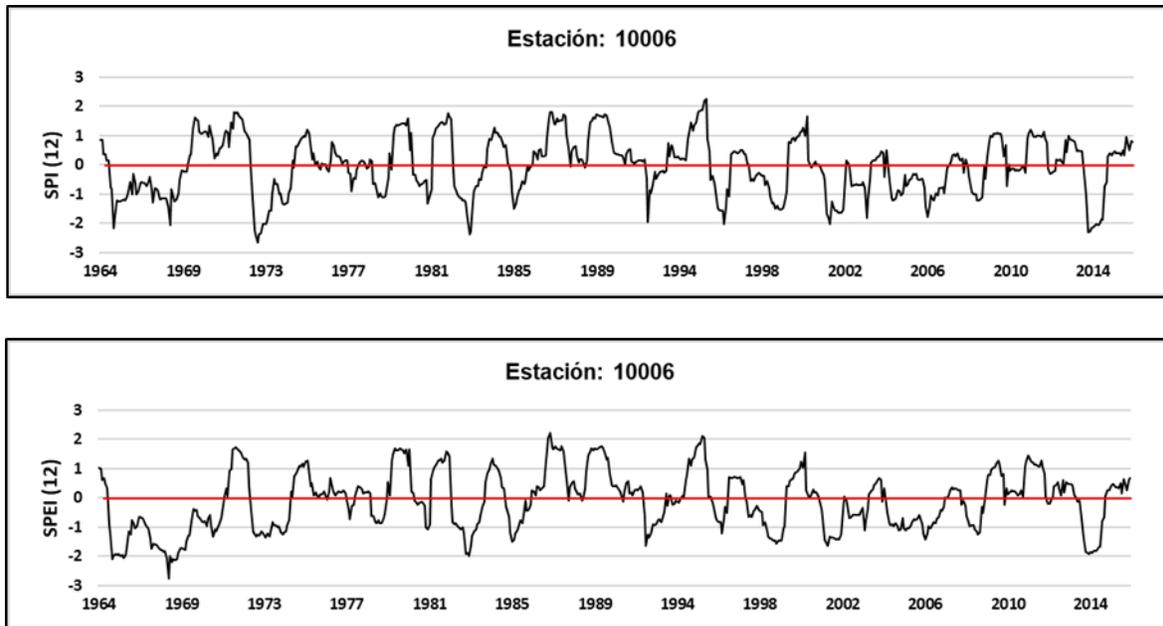


Figura 34. Estación 10006, indicadores SPI y SPEI con escala temporal 12 meses.

La estación climatológica 10016, el SPI con un 68% y el SPEI con un 65% tienen una tendencia en la categoría Cercano a lo normal. La categoría moderadamente a extremadamente seco va de los 16% y 18% respectivamente. La ocurrencia en periodos húmedos está entre 16% y 17%. Por otro lado, el SPI presentó cuatro periodos cortos dentro de la categoría moderadamente seco en los años: 1965, 1975-1976, 2003 y 2007; en la categoría severamente seco para SPI se presentaron sólo dos periodos: 1974, 1976-1978, y finalmente en tres ocasiones se presentaron sequías extremas, en los años 1969-1970, 1977 y 1991-1992. En cuanto al SPEI, los periodos que se presentaron fueron más prolongados y dentro de la categoría moderadamente seco, en los años, 1960-1970, 1974-1978, 2000-2002, 2005, 2006 y 2011-2012 (Figura 35).

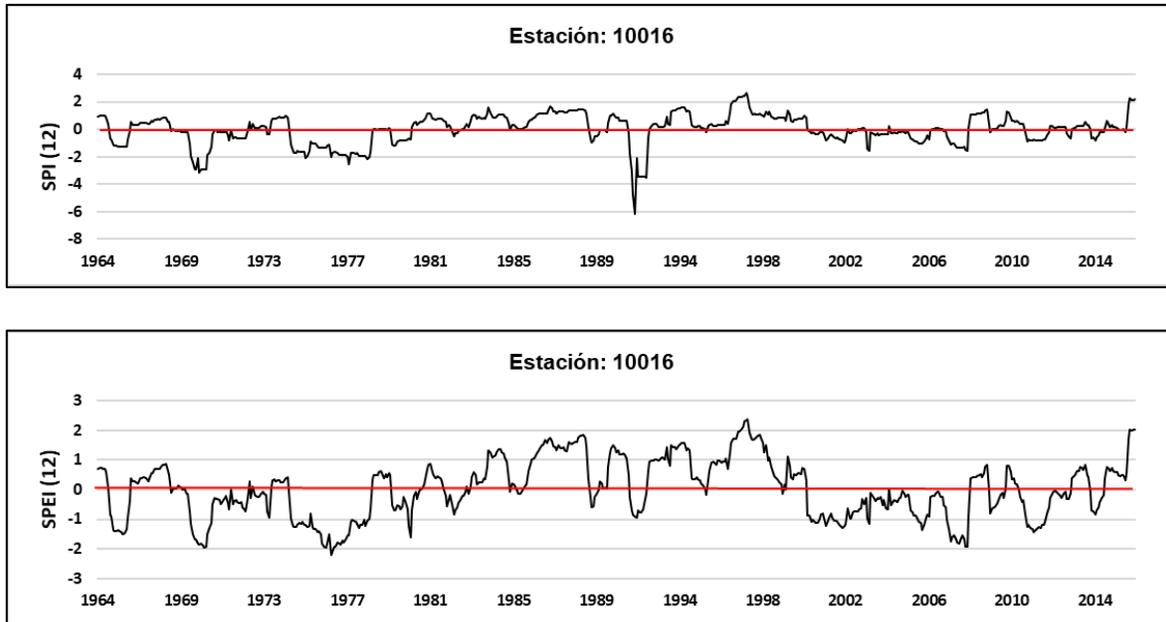


Figura 35. Estación 10016, SPI y SPEI con escala temporal 12 meses.

La estación climatológica 10018, en lo que respecta a los índices, el SPI con un 72% y el SPEI con un 71.5% tienen una tendencia en la categoría Cercano a lo normal, la categoría moderadamente a extremadamente seco va de los 15% y 14% respectivamente, la ocurrencia en periodos húmedos está entre 13% y 14.5%. Por otro lado, el SPI presentó cinco periodos cortos dentro de la categoría moderadamente seco en los años: 1969, 1975, 1975, 1982 y 1995; dentro de la categoría severamente seco para SPI se presentaron tres periodos: 1988, 2005 y 2011 y finalmente la ocurrencia de sequías extremas estuvo en los años 1989 y 2001-2003, este último siendo un periodo prolongado de tres años con sequía extrema. En cuanto al SPEI, los periodos tuvieron una misma tendencia que el SPI, a diferencia que los valores fueron de menor intensidad (Figura 36).

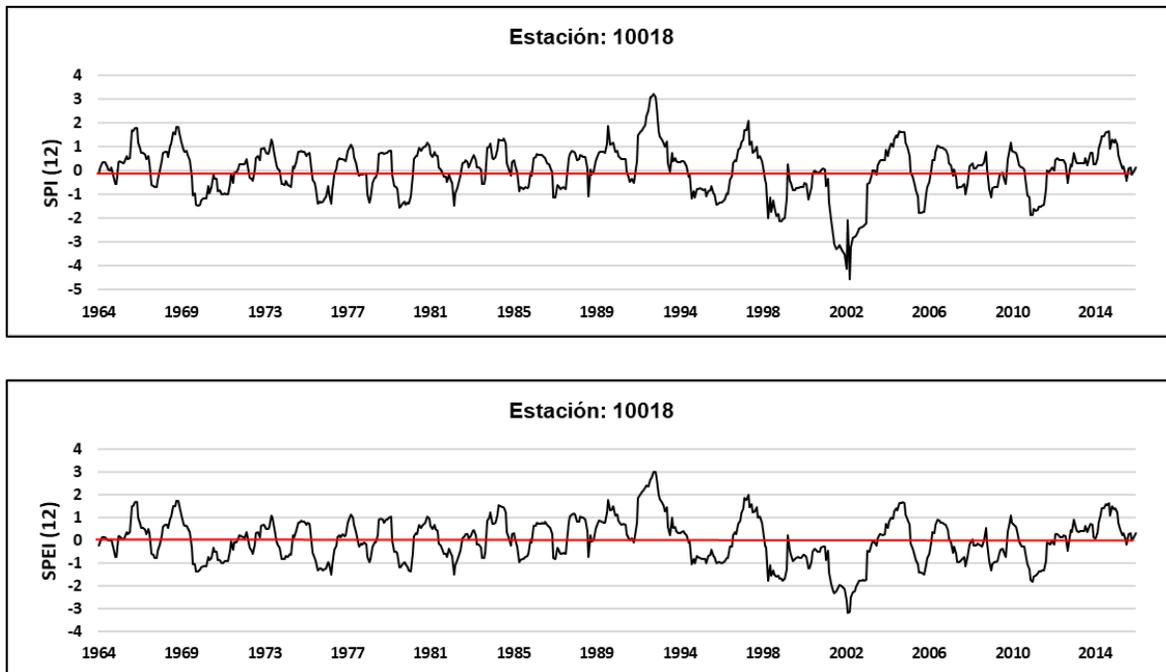


Figura 36. Estación 10018, SPI y SPEI con escala temporal 12 meses.

La estación climatológica 10023, el SPI y SPEI ambos indicadores tienen una tendencia en la categoría Cercano a lo normal con un 66%. La categoría moderadamente a extremadamente seco va de los 17.5% y 17% respectivamente. La ocurrencia en periodos húmedos está entre el 16% y 17%. Por otro lado, para el caso de esta estación en particular se tiene una gran similitud en los periodos sequía, por ejemplo: el SPI presentó nueve periodos dentro de la categoría moderadamente seco en los años: 1965, 1969, 1974, 1986, 1994-1996, 1997, 2005, 2007 y 2012; dentro de la categoría severamente seco SPI presentó cuatro periodos: 1975, 1979-1980, 1998 y 2000; la ocurrencia de sequías extremas estuvo presente en 5 periodos, en los años, 1972, 1982, 1989, 1992 y 2011-2013, este último con una prolongación de tiempo de 3 años y con gran intensidad. De esta manera se puede decir que, para el SPEI, los periodos tuvieron una misma tendencia que el SPI, a diferencia que los valores presentaron una muy ligera menor intensidad (Figura 37).

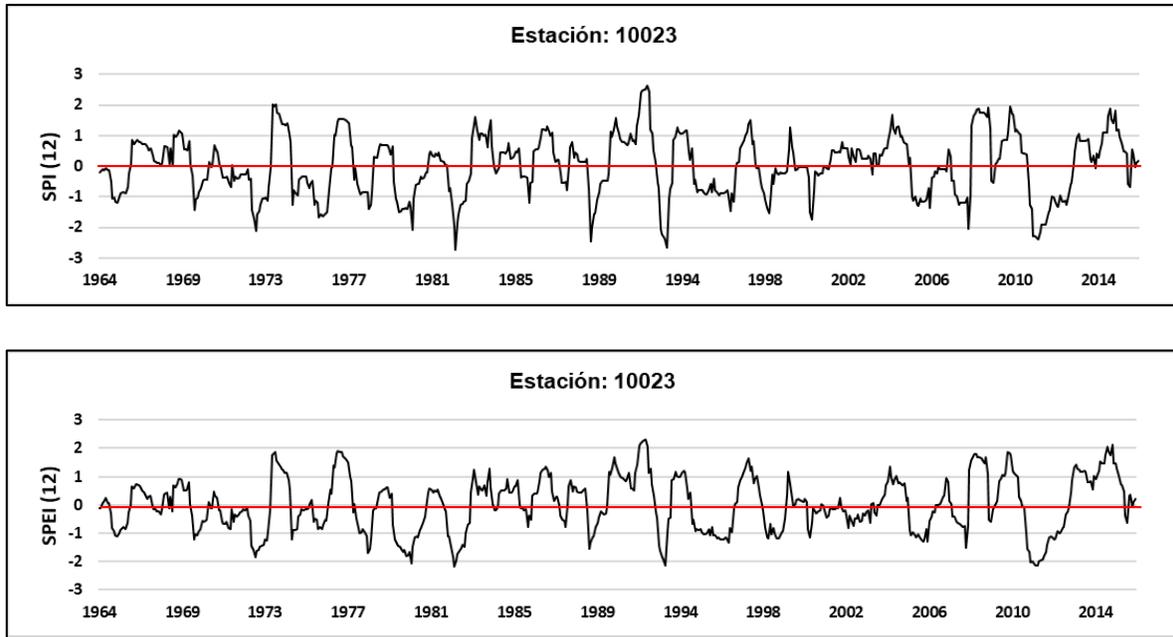


Figura 37. Estación 10023, SPI y SPEI con escala temporal 12 meses.

La estación climatológica 10030, en lo que respecta a los índices, el SPI y SPEI ambos indicadores tienen una tendencia en la categoría Cercano a lo normal con un 64.5% y 63%, la categoría moderadamente a extremadamente seco va de los 17.5% y 19.5% respectivamente, la ocurrencia en periodos húmedos está entre el 18% y 17.5%. Por otro lado, el SPI presentó cinco periodos de sequía dentro de la categoría moderadamente seco en los años: 1994-1996, 1998-1999, 2001, 2005 y 2012-2013; dentro de la categoría severamente seco SPI presentó tres periodos: 1989, 1997-1998 y 2011-2012; la ocurrencia de sequías extremas estuvo presente en sólo en un periodo, entre 1977 y 1978. De esta manera decir que, para el SPEI, los periodos tuvieron una misma tendencia que el SPI, a diferencia que los valores presentaron una ligera menor intensidad (Figura 38).

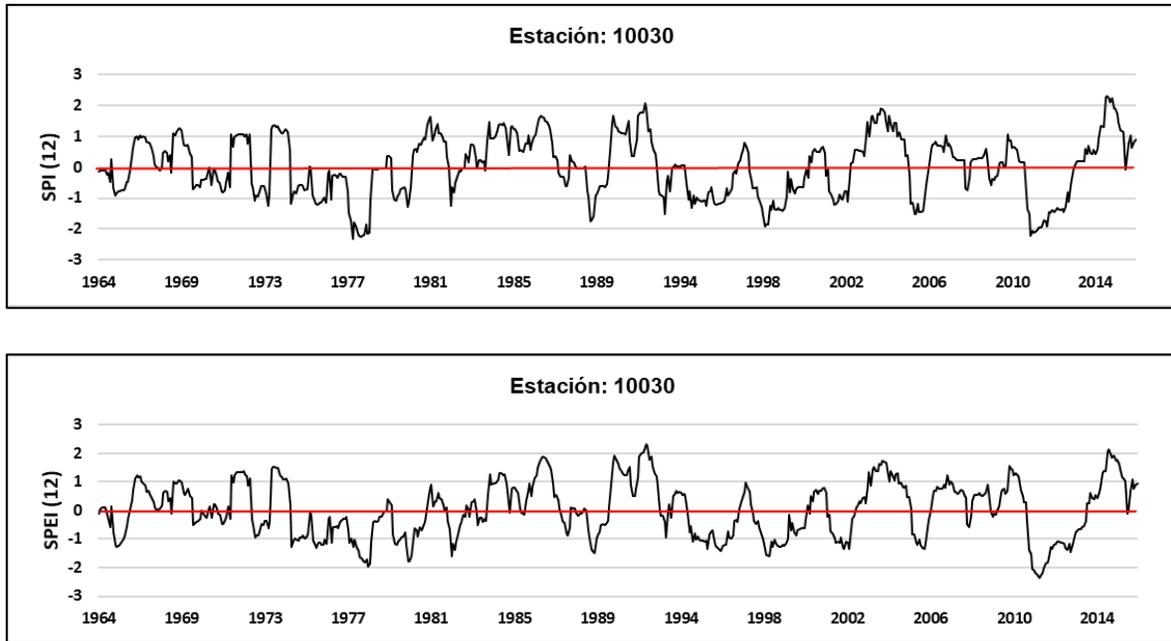


Figura 38. Estación 10030, SPI y SPEI con escala temporal 12 meses.

La estación climatológica 10047, en lo que respecta a los índices, el SPI y SPEI ambos indicadores tienen una tendencia en la categoría Cercano a lo normal con un 69% y 68.5%, la categoría moderadamente a extremadamente seco va de los 14.5% y 15.5% respectivamente, la ocurrencia en periodos húmedos está entre el 16.5% y 16%. Por otro lado, el SPI presentó cinco periodos de sequía dentro de la categoría moderadamente seco en los años: 1969, 1982, 1992, 1995-1996 y 2012-2013; dentro de la categoría severamente seco SPI presentó 3 periodos: 1996, 2001-2002 y 2006; la ocurrencia de sequías extremas estuvo presente en cuatro periodos, entre 1979-1980, 1989, 1998-1999 y 2011-2012. De esta manera se puede decir que, para el SPEI, los periodos tuvieron una misma tendencia que el SPI, a diferencia que los valores presentaron menor intensidad (Figura 39).

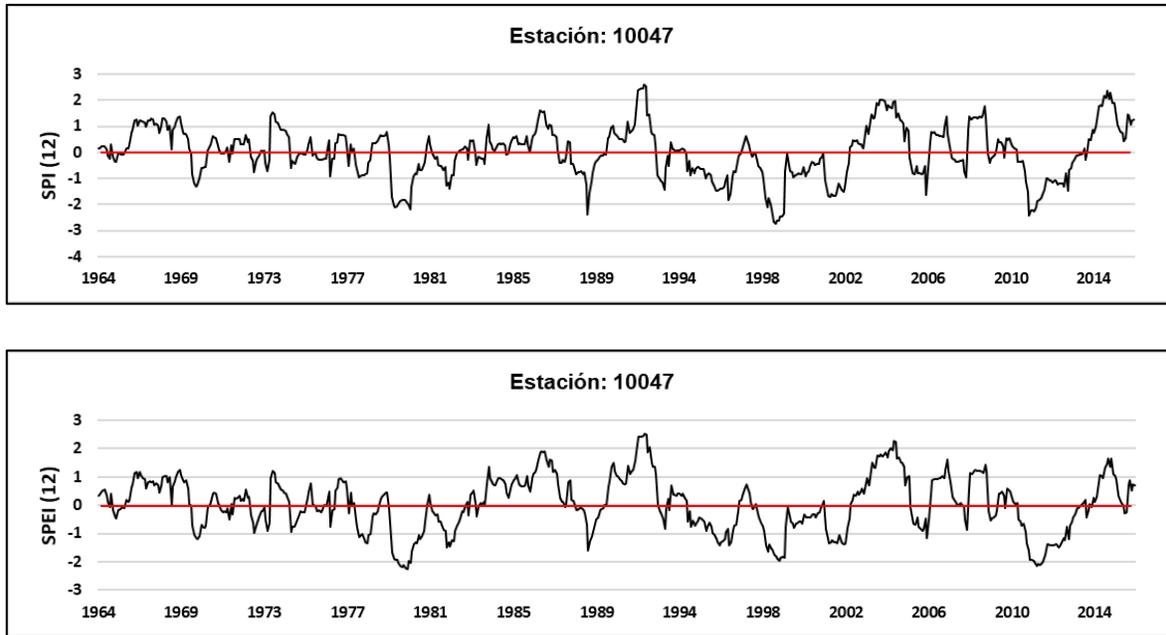


Figura 39. Estación 10047, SPI y SPEI con escala temporal 12 meses.

La estación climatológica 10048, en lo que respecta a los índices, el SPI y SPEI ambos indicadores tienen una tendencia en la categoría Cercano a lo normal con 65.5%, la categoría moderadamente a extremadamente seco va de los 19% y 17% respectivamente, la ocurrencia en periodos húmedos está entre el 15.5% y 17.5%. Por otro lado, el SPI presentó seis periodos de sequía dentro de la categoría moderadamente seco en los años: 1978, 1993, 1995-1996, 2006, 2011-2013; dentro de la categoría severamente seco SPI presentó dos periodos: 1975-1976 y 1999-2000; la ocurrencia de sequías extremas estuvo presente en cuatro periodos, entre 1978, 1979-1980, 1982 y 1998. De esta manera se puede decir que, para el SPEI, los periodos tuvieron una misma tendencia que el SPI, a diferencia que los valores presentaron menor intensidad (Figura 40).

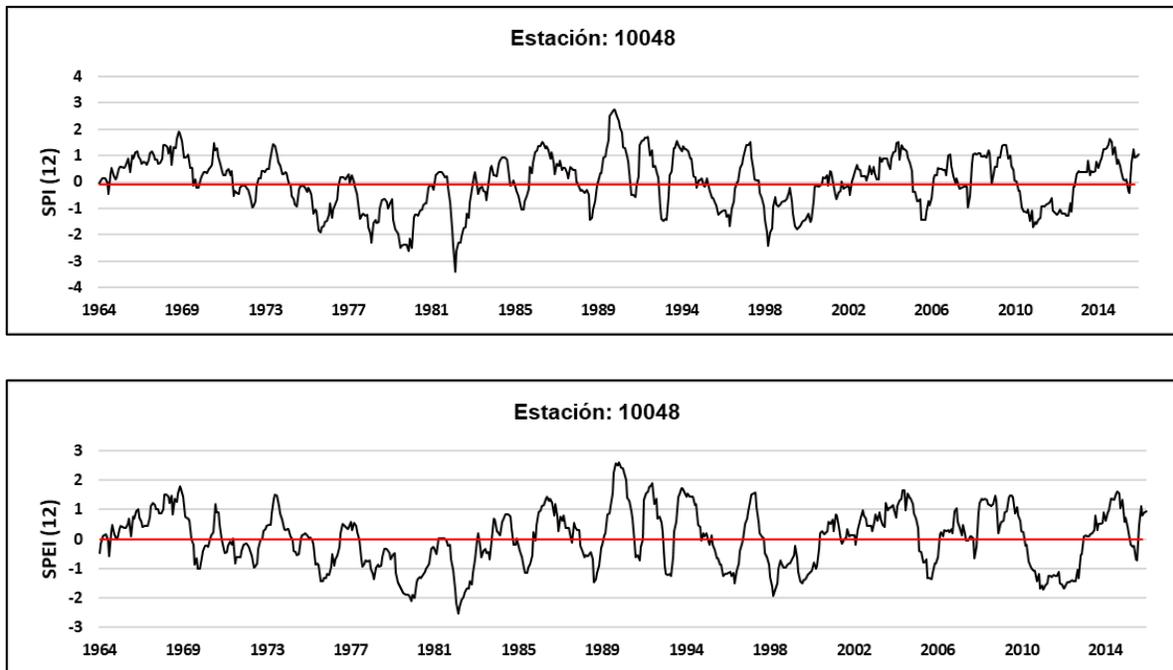


Figura 40. Estación 10048, SPI y SPEI con escala temporal 12 meses.

La estación climatológica 10051, en lo que respecta a los índices, el SPI y SPEI ambos indicadores tienen una tendencia en la categoría Cercano a lo normal con 67% y 64%, la categoría moderadamente a extremadamente seco va de los 17.5% y 19% respectivamente, la ocurrencia en periodos húmedos está entre el 15.5% y 17%. Por otro lado, el SPI presentó seis periodos de sequía dentro de la categoría moderadamente seco en los años: 1965, 1979-1980, 1982, 1998-1999, 2000 y 2012-2013; dentro de la categoría severamente seco SPI presentó seis periodos: 1976, 1978, 1980, 1989, 1995-1996 y 2006; la ocurrencia de sequías extremas estuvo presente en cuatro periodos, entre 1997-1998, 2008 y 2011-2012. De esta manera podemos decir que, para el SPEI, dentro de los primeros siete años, es decir, 1964-1971, los valores se comportaron con mayor intensidad, el resto del periodo 1972-2016 tuvieron una misma tendencia que el SPI, a diferencia que los valores presentaron con menor intensidad (Figura 41).

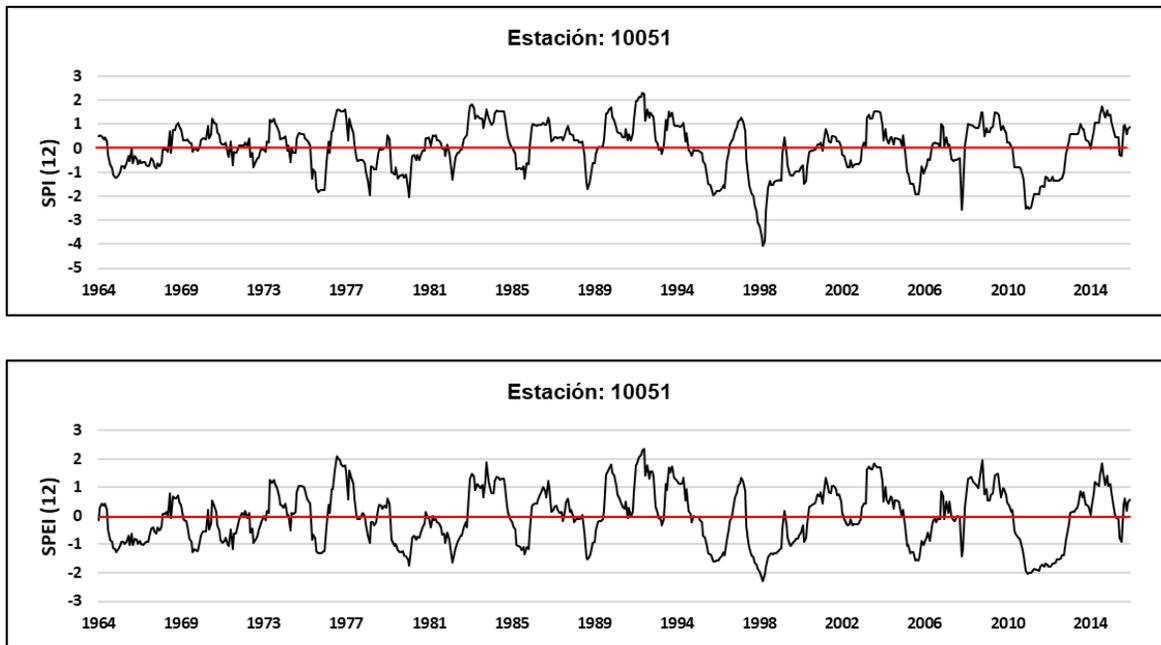


Figura 41. Estación 10051, SPI y SPEI con escala temporal 12 meses.

La estación climatológica 10055, en lo que respecta a los índices, el SPI y SPEI ambos indicadores tienen una tendencia en la categoría Cercano a lo normal con el 65%, la categoría moderadamente a extremadamente seco va de los 17% y 19% respectivamente, la ocurrencia en periodos húmedos está entre el 18% y 16%. Por otro lado, el SPI presentó 9 periodos de sequía dentro de la categoría moderadamente seco en los años: 1972-1973, 1975-1976, 1980, 1993, 1994-1996, 1998-1999, 2001-2002, 2005-2006 y 2012-2013, dentro de la categoría severamente seco SPI presentó dos periodos: 1989 y 1998, la ocurrencia de sequías extremas estuvo presente en dos periodos, entre 1977-1978 y 2011-2012. De esta manera se establece que, para el SPEI los valores tuvieron una misma tendencia que el SPI, a diferencia que los valores presentaron con menor intensidad (Figura 42).

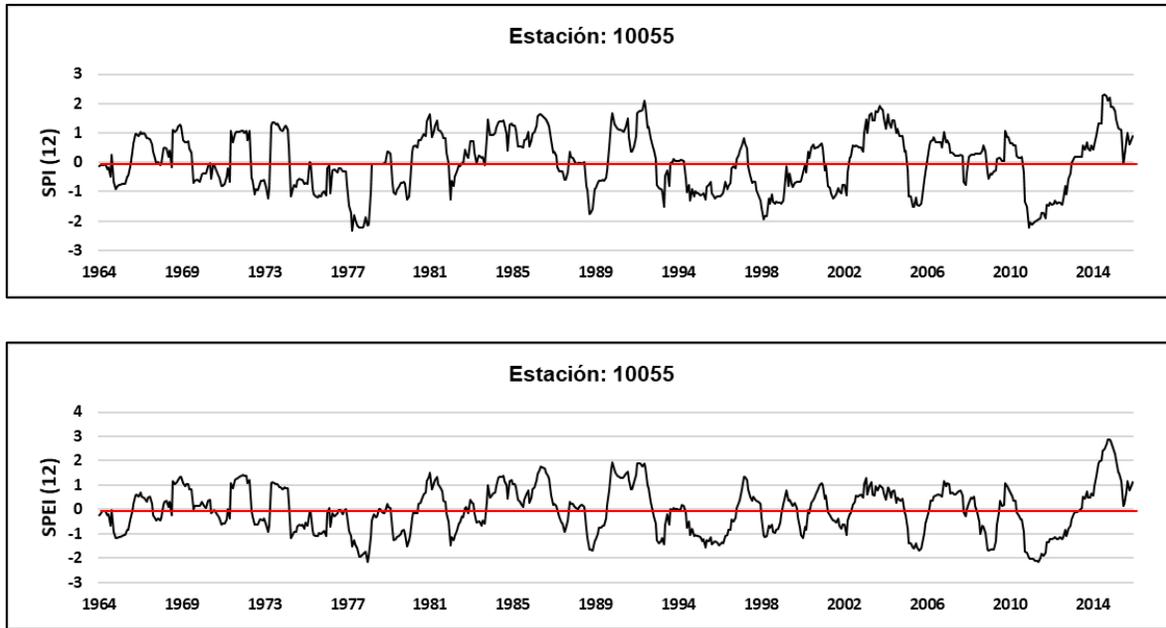


Figura 42. Estación 10055, SPI y SPEI con escala temporal 12 meses.

La estación climatológica 10076, en lo que respecta a los índices, el SPI y SPEI ambos indicadores tienen una tendencia en la categoría Cercano a lo normal con 70% y 65%, la categoría moderadamente a extremadamente seco va de los 15.5% y 19% respectivamente, la ocurrencia en periodos húmedos está entre el 14.5% y 16%. Por otro lado, el SPI presentó siete periodos de sequía dentro de la categoría moderadamente seco en los años: 1965, 1969, 1972, 1986, 1988, 2005-2006, 2008 y 2016; dentro de la categoría severamente seco SPI presentó dos periodos: 1979-1980 y 1989; la ocurrencia de sequías extremas estuvo presente en cuatro periodos, entre 1980, 1982, 1993 y 2011-2013. De esta manera se establece que, para el SPEI, los valores tuvieron una misma tendencia que el SPI, a diferencia que los valores presentaron menor intensidad (Figura 43).

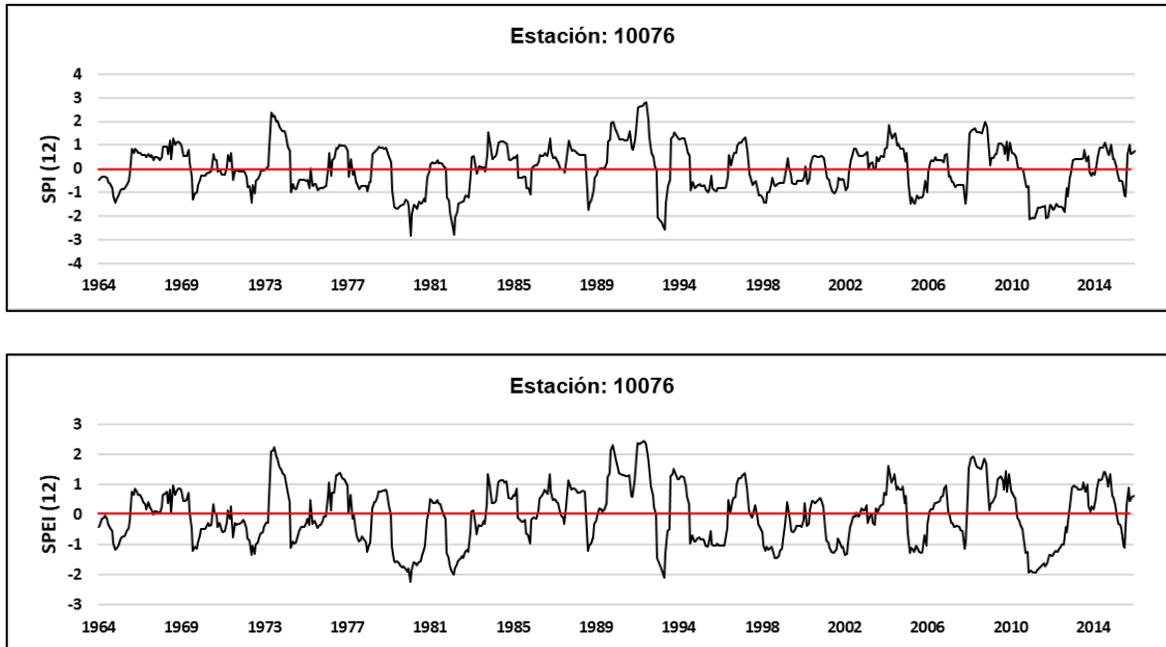


Figura 43. Estación 10076, SPI y SPEI con escala temporal 12 meses.

La estación climatológica 10090, en lo que respecta a los índices, el SPI y SPEI ambos indicadores tienen una tendencia en la categoría Cercano a lo normal con el 65% y 64%, la categoría moderadamente a extremadamente seco se encuentra en el 18% respectivamente, la ocurrencia en periodos húmedos esta entre el 17% y 18%. Por otro lado, el SPI presentó diez periodos de sequía dentro de la categoría moderadamente seco en los años: 1974, 1976, 1978, 1986, 1993, 1995-1996, 1998, 2000, 2006 y 2008; dentro de la categoría severamente seco SPI presentó cinco periodos: 1976, 1986, 1998-1999, 2011 y 2013; la ocurrencia de sequías extremas estuvo presente en solo en dos periodos, entre 1971 y 1980. De esta manera se observa que, para el SPEI, los valores tuvieron una misma tendencia que el SPI, a diferencia que los valores fueron con menor intensidad (Figura 44).

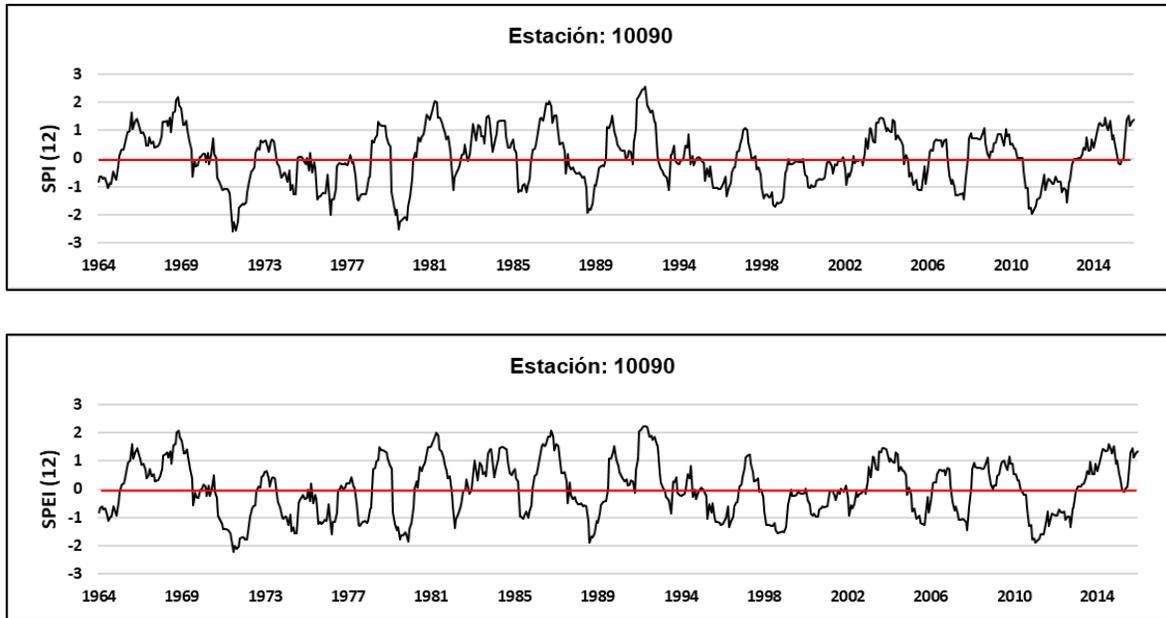


Figura 44. Estación 10090 SPI y SPEI con escala temporal 12 meses.

Para la estación climatológica 10093, en lo que respecta a los índices, el SPI y SPEI ambos indicadores tienen una tendencia en la categoría Cercano a lo normal con el 65% y 64%, la categoría moderadamente a extremadamente seco se encuentra en el 18% respectivamente, la ocurrencia en periodos húmedos está entre el 17% y 18%. Por otro lado, el SPI presentó diez periodos de sequía dentro de la categoría moderadamente seco en los años: 1974, 1976, 1978, 1986, 1993, 1995-1996, 1998, 2000, 2006 y 2008; dentro de la categoría severamente seco SPI presentó cinco periodos: 1976, 1986, 1998-1999, 2011 y 2013; la ocurrencia de sequías extremas estuvo presente en sólo en dos periodos, entre 1971 y 1980. De esta manera se infiere decir que, para el SPEI, los valores tuvieron una misma tendencia que el SPI, a diferencia que los valores presentaron menor intensidad (Figura 45).

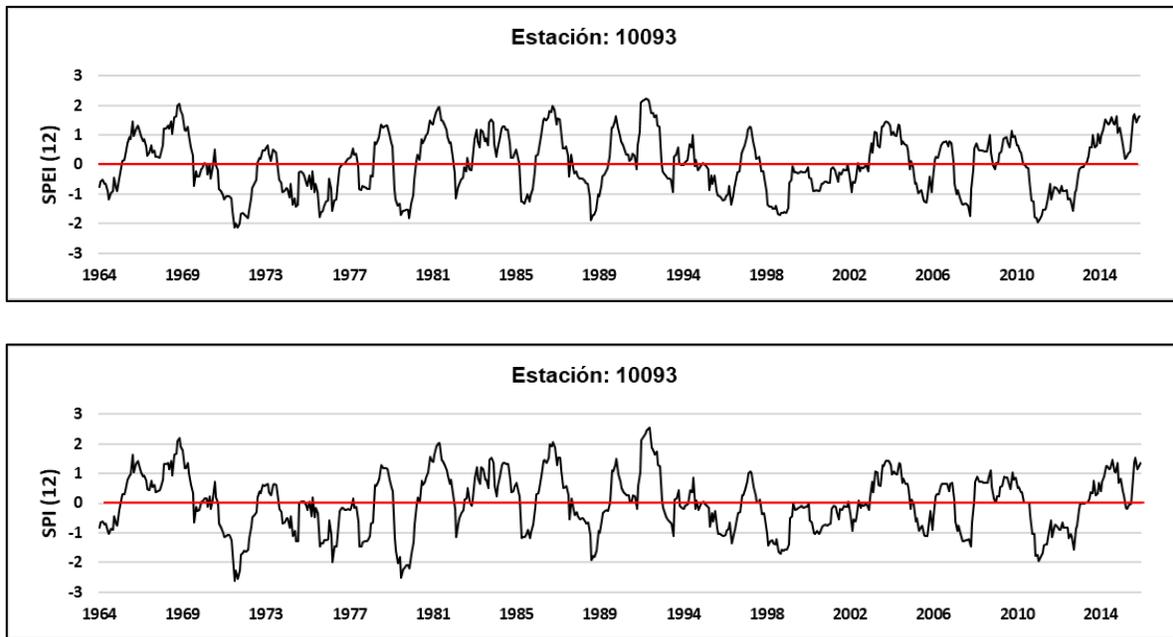


Figura 45. Estación 10093, SPI y SPEI con escala temporal 12 meses.

Para la estación climatológica 32038, en lo que respecta a los índices, el SPI y SPEI ambos indicadores tienen una tendencia en la categoría Cercano a lo normal con el 69%, la categoría moderadamente a extremadamente seco se encuentra en el 16% y 17% respectivamente, la ocurrencia en periodos húmedos está entre el 15% y 16%. Por otro lado, el SPI presentó cinco periodos de sequía dentro de la categoría moderadamente seco en los años: 1976, 1978, 1999-2000, 2001 y 2006; dentro de la categoría severamente seco SPI presentó cinco periodos: 1969-1970, 1980-1981, 1989, 1993 y 2012-2013; la ocurrencia de sequías extremas estuvo presente en cinco periodos, entre 1978, 1980, 1982, 1998 y 2011-2012. De esta manera se puede decir que, para el SPEI, dentro de los primeros cuatro años, es decir, 1964-1968, los valores se comportaron con mayor intensidad, el resto del periodo 1969-2016 tuvieron una misma tendencia que el SPI, a diferencia que los valores presentaron menor intensidad (Figura 46).

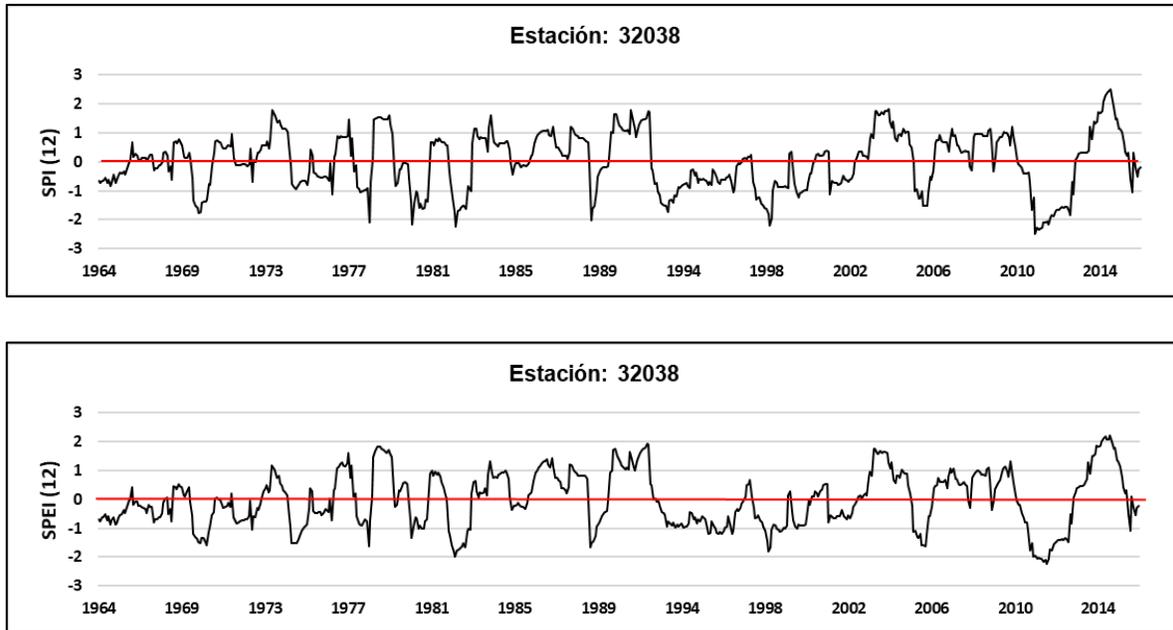


Figura 46. Estación 32038, SPI y SPEI con escala temporal 12 meses.

En el cuadro 20 se presenta, a manera de resumen el porcentaje de los periodos normales, húmedos y secos, para una escala temporal de 12 meses, de todas las estaciones evaluadas en la cuenca del río Nazas. Destacando que, para ambos indicadores (SPI y SPEI), se obtuvo en promedio en la zona de estudio un 18% de periodos secos, que van desde moderadamente seco a extremadamente seco, para el periodo de 1964-2016.

Cuadro 20. Porcentajes de ocurrencia de periodos húmedos, normales y secos para las estaciones climatológicas evaluadas a través de los métodos SPI y SPEI en intervalos/escala de 12 meses.

Estación (clave)	SPI (12)			SPEI (12)		
	Periodo húmedo (%)	Normal (%)	Periodos secos (%)	Periodo húmedo (%)	Normal (%)	Periodos secos (%)
5036	18	64.5	17.5	17.5	62.5	20
10006	19	68.5	12.5	19	66	15
10016	16	68	16	17	65	18
10018	13	72	15	14.5	71.5	14
10023	16	66	17.5	17	66	17
10030	18	64.5	17.5	17.5	63	19.5
10047	16.5	69	14.5	16	68.5	15.5
10048	15.5	65.5	19	17.5	65.5	17
10051	15.5	67	17.5	17	64	19
10055	18	65	17	16	65	19
10076	14.5	70	15.5	16	65	19
10090	17	65	18	18	64	18
10093	17	65	18	18	64	18
32038	15	69	16	16	69	17
Promedio	16	67	17	17	66	18

En el Cuadro 21 se presentan las estaciones climatológicas de los periodos de evaluación de sequía del SPI y SPEI, observando que en ambos periodos coinciden en un 90%.

Cuadro 21. Periodos secos calculados con SPI y SPEI de 1964-2016.

Estación (clave)	SPI (12)	SPEI (12)
	Periodos secos (años)	Periodos secos (años)
5036	1965-1966, 1970-1971, 1974-1975, 1977-1979-1980, 1982, 1989, 1994-1996, 1998, 2005-2006 y 2010-2013	1965, 1970, 1974-1975, 1977-1978, 1980, 1982, 1989-1990, 1994-1996, 1998-1999, 2005-2006 y 2011-2013
10006	1964-1965, 1967-1968, 1972-1973, 1978, 1983, 1985, 1992, 1995, 1998, 2000-2004, 2006, 2008 y 2014	1965, 1970, 1972-1974, 1981, 1983, 1985, 1992, 1996, 1998-1999, 2001-2002, 2005-2006, 2009 y 2014-2015
10016	1965, 1969-1970, 1974-1978, 1991-1992, 2003 y 2007	1965-1966, 1969-1970, 1974-1978, 1980, 2000-2002, 2006, 2008 y 2011-2013
10018	1969, 1975, 1975, 1982, 1988-1989, 1995, 2001-2003, 2005 y 2011	1969-1970, 1975-1976, 1980, 1982, 1998-1999, 2001-2003, 2006, 2009 y 2011-2013



Estación (clave)	SPI (12)	SPEI (12)
	Periodos secos (años)	Periodos secos (años)
10023	1965, 1969, 1972, 1974-1975, 1979-1980, 1982, 1986, 1989, 1992, 1994-1996-1998, 2000, 2005, 2007 y 2011-2013	1965, 1969, 1972-1973, 1978, 1980, 1982-1983, 1989, 1993, 1995-1996, 1998-1999, 2005-2006, 2008 y 2011-2013
10030	1977, 1978, 1994-1999, 2001, 2005 y 2011-2013	1965-1966, 1974-1976, 1978, 1980, 1982, 1989, 1994-1996, 1998-1999, 2001-2002, 2005 y 2011-2013
10047	1969, 1979-1980, 1982, 1989, 1992, 1995-1996, 1998-1999, 2001-2002, 2006 y 2011-2013	1969, 1978, 1978-1980, 1982, 1989, 1995-1996, 1998-1999, 2001-2002 y 2011-2013
10048	1975-1976, 1978, 1980, 1982, 1993, 1995-1996, 1998-2000, 2006, 2011-2013	1975-1976, 1978, 1979, 1981-1983, 1986, 1989, 1993, 1995-1996, 1998, 1999-2000, 2006 y 2011-2013
10051	1965, 1976, 1979-1980, 1982, 1989, 1995-1999, 2000, 2006, 2008 y 2011-2013	1965, 1969, 1976, 1979-1980, 1982, 1986, 1989, 1995-1996, 1997-1999, 2005-2006 y 2011-2013
10055	1972-1973, 1975-1978, 1980, 1989, 1993, 1994-1996, 1998-1999, 2001-2002, 2005-2006 y 2011-2013	1966, 1975, 1977-1978, 1979-1980, 1982, 1989, 1993, 1994-1996, 2005-2006, 2009 y 2011-2013
100076	1965, 1969, 1972, 1979-1980, 1982, 1986, 1989, 1993, 1988, 2005-2006, 2008, 2011-2013 y 2016	1965-1966, 1969, 1972, 1978, 1979-1981, 1982-1983, 1993, 1995-1996, 1998-1999, 2001-2002, 2005-2006 y 2011-2013
10090	1971, 1974, 1976, 1978, 1980, 1986, 1993, 1995-1996, 1999, 2000, 2006, 2008, 2011 y 2013	1965, 1970-1972, 1974, 1975-1976, 1978, 1979-1980, 1982, 1989, 1995-1996, 1998-1999, 2006, 2008 y 2011-2013
10093	1971, 1974, 1976, 1978, 1980, 1986, 1993, 1995-1996, 1999, 2000, 2006, 2008, 2011 y 2013	1965, 1971-1972, 1974, 1975-1976, 1980, 1982, 1986, 1989, 1995-1996, 1998-1999, 2006, 2008 y 2011-2013
32038	1969-1970, 1976, 1978, 1980-1982, 1989, 1993, 1998-2000, 2001 y 2006, 2011-2013	1969-1970, 1974, 1982-1983, 1989, 1995-1996, 1998-1999, 2006 y 2011-2013

En los Cuadros 22 y 23 se presenta un resumen de los estadísticos (media, máximo, mínimo y desviación estándar) a partir de los indicadores de sequía de cada estación evaluada de cada estación climatológica.



Cuadro 22. Estadística del indicador SPI por estación climatológica.

Clave Estación	SPI 6 meses				SPI 12 meses			
	Media	Máximo	Mínimo	Desviación Estándar	Media	Máximo	Mínimo	Desviación Estándar
5036	0.008	2.949	-2.520	0.974	0.005	2.313	-2.332	0.975
10006	-0.005	2.270	-3.789	1.017	0.003	2.278	-2.633	0.983
10016	0.012	2.551	-4.143	0.989	-0.020	2.612	-6.185	1.094
10018	0.007	2.654	-3.701	0.994	-0.007	3.207	-4.578	1.050
10023	0.002	2.531	-2.824	0.994	0.003	2.617	-2.720	0.983
10030	0.009	2.950	-2.520	0.974	0.005	2.313	-2.332	0.975
10047	0.001	2.593	-3.300	1.001	0.002	2.599	-2.741	0.993
10048	-0.004	2.959	-3.743	1.023	0.001	2.745	-3.403	1.001
10051	-0.003	2.551	-4.123	1.026	-0.002	2.301	-4.090	1.020
10055	0.009	2.950	-2.520	0.974	0.005	2.313	-2.332	0.975
10076	0.006	2.914	-2.840	0.983	0.003	2.798	-2.850	0.987
10090	0.007	2.444	-2.649	0.977	0.004	2.550	-2.610	0.977
10093	0.007	2.444	-2.649	0.977	0.004	2.550	-2.610	0.977
32038	0.008	2.936	-3.026	0.985	0.004	2.516	-2.486	0.982

Cuadro 23. Estadística del indicador SPEI por estación climatológica.

Clave Estación	SPEI 6 meses				SPEI 12 meses			
	Media	Máximo	Mínimo	Desviación Estándar	Media	Máximo	Mínimo	Desviación Estándar
5036	-0.087	2.854	-2.253	0.994	-0.016	2.150	-1.988	0.979
10006	-0.006	2.230	-2.290	0.986	-0.057	2.210	-2.744	1.010
10016	0.034	3.684	-2.114	0.999	-0.001	2.370	-2.203	0.979
10018	-0.094	2.232	-2.809	1.032	0.011	3.020	-3.175	0.975
10023	-0.034	2.955	-2.719	0.994	-0.003	2.324	-2.188	0.966
10030	-0.043	2.376	-3.152	0.984	0.007	2.305	-2.381	0.976
10047	-0.071	3.192	-2.695	0.982	0.026	2.537	-2.269	0.969
10048	0.011	2.380	-2.573	0.973	0.026	2.619	-2.533	0.969
10051	-0.042	2.309	-2.192	1.012	-0.042	2.332	-2.293	0.977
10055	-0.071	3.038	-3.598	1.019	-0.012	2.864	-2.160	0.970
10076	-0.060	2.880	-2.705	0.997	-0.007	2.444	-2.235	0.968
10090	-0.056	2.119	-2.059	0.980	0.014	2.244	-2.239	0.976
10093	-0.062	2.290	-1.947	0.994	0.013	2.231	-2.144	0.974
32038	-0.062	2.895	-2.626	0.992	-0.022	2.210	-2.247	0.964

A continuación, se presentan los resultados de la evaluación de sequía meteorológica con escala temporal de seis meses en la cuenca del Río Nazas para el periodo 1964-2016 (Anexo 9).

En lo que respecta para al SPI presentó un 67.43% con una tendencia en la categoría cercano a lo normal. La ocurrencia en periodos húmedos es del 15.9%. Para la ocurrencia de periodos secos en la categoría moderadamente seco se presentó un 9.93%. En la categoría severamente seco fue de 4.18%. Finalmente, en la categoría extremadamente seco se presentó el 2.57%. Estos porcentajes se obtuvieron con base en las duraciones de sequía de ambos índices. (Cuadro 24).

Cuadro 24. Porcentaje de intensidad de sequía de SPI para una escala temporal de seis meses.

Estación (clave)	Categorías de intensidad SPI (6)						
	Extremadamente húmedo (%)	Muy húmedo (%)	Moderadamente húmedo (%)	Normal (%)	Moderadamente seco (%)	Severamente seco (%)	Extremadamente seco (%)
5036	1.5	4.5	9.5	68.0	11.0	4.0	1.5
10006	0.5	4.0	11.5	65.5	11.0	4.0	3.5
10016	2.0	3.0	10.0	68.0	10.0	5.0	2.0
10018	1.0	4.5	11.0	68.0	8.5	4.5	2.5
10023	2.5	3.5	10.0	68.0	8.5	4.0	3.5
10030	1.5	4.5	9.5	68.0	11.0	4.0	1.5
10047	2.0	3.5	9.5	69.5	7.5	4.5	3.5
10048	1.5	4.0	9.5	68.0	8.0	5.0	4.0
10051	1.0	3.5	12.5	65.0	9.0	6.0	3.0
10055	1.5	4.5	9.5	67.5	11.0	4.5	1.5
10076	2.5	3.50	10.5	68.0	9.5	3.5	2.5
10090	2.0	3.5	11.0	66.5	12.5	2.0	2.5
10093	2.0	3.5	11.0	66.5	12.5	2.0	2.5
32038	1.0	4.0	11.0	67.5	9.0	5.5	2.0
Promedio	1.61	3.86	10.43	67.43	9.93	4.18	2.57

El SPEI presentó un 60.82% con una tendencia en la categoría cercano a lo normal. La ocurrencia en periodos húmedos es del 17.79%. Para la ocurrencia de periodos secos en la categoría moderadamente seco se presentó un 16.25%. En la categoría severamente seco fue de 4.32%. Finalmente, en la categoría extremadamente seco se presentó el 0.88% (Cuadro 25).

**Cuadro 25. Porcentaje de intensidad de sequía de SPI para una escala temporal de seis meses.**

Estación (clave)	Categorías de intensidad SPEI (6)						
	Extremadamente húmedo	Muy húmedo	Moderadamente húmedo	Normal	Moderadamente seco	Severamente seco	Extremadamente seco
5036	0.50	4.00	11.50	60.50	16.00	6.50	1.00
10006	0.50	6.50	11.50	63.00	13.50	4.00	1.00
10016	2.00	5.00	10.50	63.00	15.00	4.00	0.50
10018	0.50	4.00	16.00	56.00	17.00	5.50	1.00
10023	1.00	5.00	11.00	62.50	16.00	3.50	1.00
10030	0.50	4.50	12.50	61.00	17.00	4.00	0.50
10047	0.50	4.50	11.00	63.50	16.50	3.00	1.00
10048	0.50	5.50	13.50	60.50	17.00	2.50	0.50
10051	0.50	5.00	13.00	60.00	16.00	5.00	0.50
10055	1.00	3.50	12.50	61.50	14.50	5.50	1.50
10076	1.00	3.50	13.00	61.00	16.50	3.50	1.50
10090	0.50	4.50	13.50	57.50	20.00	3.50	0.50
10093	1.00	4.00	14.00	58.00	18.00	5.00	**
32038	1.00	5.00	10.00	63.50	14.50	5.00	1.00
Promedio	0.79	4.61	12.39	60.82	16.25	4.32	0.88

En las figuras 47-48 se muestran los histogramas de los índices SPI y SPEI con escala temporal de seis meses, donde se representa de manera general los valores de intensidad de la sequía, estas observaciones se relacionan con una clara tendencia hacia lo normal en ambos casos, se presenta una curva normal en forma de campana con un solo pico en el centro de la distribución. La distribución de probabilidad normal es simétrica alrededor de su media y, finalmente, la curva desciende de forma suave en ambas direcciones a partir del valor central.

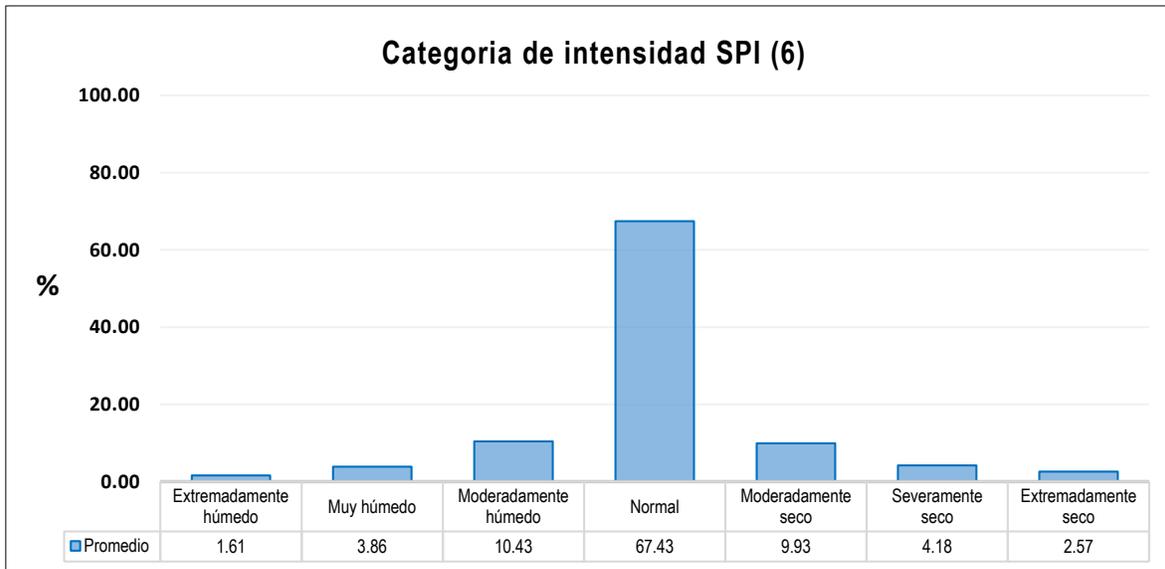


Figura 47. Intensidad del SPI con escala temporal 6 meses.

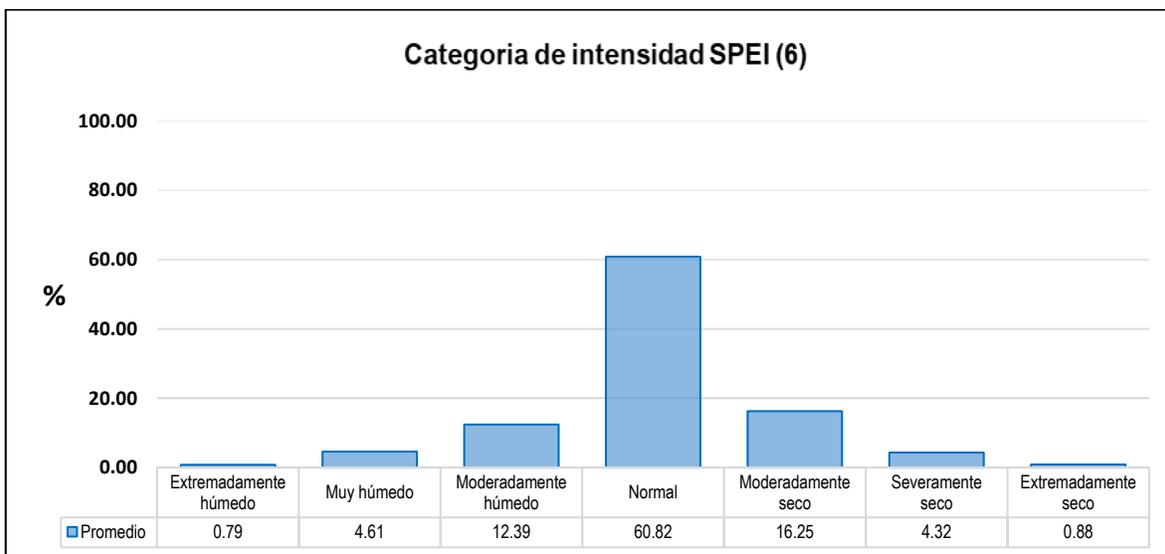


Figura 48. Intensidad del SPEI con escala temporal 6 meses.

En el Cuadro 26 se resume el porcentaje de los periodos normales, húmedos y secos con escala temporal de seis meses en todas las estaciones evaluadas. Para los indicadores SPI y SPEI, se obtuvo en promedio un 17% y 21% de periodos secos, que van desde moderadamente seco a extremadamente seco, y que claramente se observan entre los años 1964-2016. Es importante señalar que para la escala temporal de seis meses la intensidad de sequía fue mayor debido a que

se evaluaron dos periodos en un año; es decir, para el primer periodo se presentaron cinco meses secos por un mes húmedo, y por otro lado se presentaron tres meses secos por tres meses húmedos. Esto difiere de la escala temporal de 12 meses donde la evaluación fue de ocho meses secos por cuatro húmedos.

Cuadro 26. Porcentajes de ocurrencia de periodos húmedos, normales y secos para las estaciones climatológicas evaluadas a través de los métodos SPI y SPEI en intervalos/escala de seis meses.

Estación (clave)	SPI (6)			SPEI (6)		
	Periodo húmedo (%)	Normal (%)	Periodos secos (%)	Periodo húmedo (%)	Normal (%)	Periodos secos (%)
5036	15.5	68	16.5	16	60.5	23.5
10006	16	65.5	18.5	18.5	63	18.5
10016	15	68	17	17.5	63	19.5
10018	16.5	68	15.5	20.5	56	23.5
10023	16	68	16	17	62.5	20.5
10030	15.5	68	16.5	17.5	61	21.5
10047	15	69.5	15.5	16	63.5	20.5
10048	15	68	17	19.5	60.5	20
10051	17	65	18	18.5	60	21.5
10055	15.5	67.5	17	17	61.5	21.5
10076	16.5	68	15.5	17.5	61	21.5
10090	16.5	66.5	17	18.5	57.5	24
10093	16.5	66.5	17	19	58	23
32038	16	67.5	16.5	16	63.5	20.5
Promedio	16	67	17	18	61	21

En el Cuadro 27 se presentan los valores de la ocurrencia de periodos secos entre los índices SPI y SPEI en las escalas temporales de seis y doce meses. De acuerdo con los resultados se observa que para el índice SPI las ocurrencias de sequía en la escala temporal de seis y doce meses tuvieron una intensidad semejante. Por otro lado, para el caso del SPEI, la intensidad fue mayor en la escala temporal de seis meses. El SPEI siempre mantuvo una mayor intensidad entre las escalas temporales evaluadas; estas observaciones se relacionan con el método de cálculo de cada índice, como se mencionó anteriormente, para el SPI solo se utiliza la variable precipitación y para el caso del SPEI se utilizan dos: precipitación y

temperatura máxima y mínima. De tal forma que, al utilizar más variables climatológicas los resultados son más confiables.

Cuadro 27. Comparativo de ocurrencias de periodos secos en las estaciones climatológicas evaluadas a través de los métodos SPI y SPEI en intervalos/escala de seis y doce meses.

Estación (clave)	SPI (6)	SPI (12)	SPEI (6)	SPEI (12)
	Periodos secos (%)		Periodos secos (%)	
5036	16.5	17.5	23.5	20.0
10006	18.5	12.5	18.5	15.0
10016	17.0	16.0	19.5	18.0
10018	15.5	15.0	23.5	14.0
10023	16.0	17.5	20.5	17.0
10030	16.5	17.5	21.5	19.5
10047	15.5	14.5	20.5	15.5
10048	17.0	19.0	20.0	17.0
10051	18.0	17.5	21.5	19.0
10055	17.0	17.0	21.5	19.0
10076	15.5	15.5	21.5	19.0
10090	17.0	18.0	24.0	18.0
10093	17.0	18.0	23.0	18.0
32038	16.5	16.0	20.5	17.0
Promedio	17	17	21	18

En relación con el Cuadro 21 (Periodos secos calculados con SPI y SPEI de 1964-2016) se reflejó que, del periodo evaluado en promedio se obtuvieron 11 periodos secos para el índice SPI y con respecto al índice SPEI se obtuvieron 12 periodos secos, considerando que, bajo este índice se estimaron las variables de precipitación y temperatura. Hay que mencionar también que el SPI en la década de 1970's mostró mayores periodos secos, principalmente entre los años de 1974-1978, y para los 2000's entre los años 2003-2007 (Esquivel *et al.*, 2019). En relación al SPEI las décadas de 1970's y 1980's fueron donde se presentaron más periodos secos, entre los años de 1972-1978, 1980-1985 y 1989 (CENAPRED, 2001). De modo que, de acuerdo con los resultados obtenidos considerando el SPI y SPEI, solo se encontraron pequeñas diferencias entre ambos índices; a pesar que, el SPI



requiere menos datos que el SPEI y, de acuerdo a otros estudios el SPEI tiene mayor capacidad y mejor correlación de datos (Vicente-Serrano *et al.*, 2012b).

8. CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES



En este estudio se analizaron los periodos de sequía en la cuenca del río Nazas entre los años 1964 - 2016 y, con base en los resultados obtenidos, se llegó a las siguientes conclusiones:

La caracterización física de la cuenca del río Nazas se realizó integrando el sistema de información geográfica (SIG) y considerando el sistema de drenaje del río.

El script HOMER.R, herramienta para la homogenización de series climáticas, principalmente precipitación y temperatura, facilitó el análisis debido a que se utilizaron grandes conjuntos de datos. Este es *software* libre y, en este estudio, contribuyó en el control de calidad de las series de tiempo, puntos de ruptura o cambio en los datos, corrección de valores y, posteriormente, en el diseño y evaluación de escenarios de sequía

Se calcularon las series de tiempo para los índices de sequía SPI y SPEI utilizando precipitación y temperatura a diferentes escalas temporales (6 y 12 meses), en 14 estaciones climatológicas, entre los años 1964-2016. Es importante señalar que la complejidad de la sequía da como resultado que no exista una variable física única que pueda cuantificarla y medirla.

Para el SPI y SPEI se obtuvo un promedio en la zona de estudio del 18% de periodos secos, que van desde moderadamente seco a extremadamente seco para la escala temporal de 12 meses. De manera similar para la escala temporal de seis meses se obtuvo un 18% de periodos secos, porcentaje obtenido con base en las duraciones de sequía de ambos índices.

En la cuenca del río Nazas, las sequías siempre han estado presentes; así, la CONAGUA (2017) reportó que la cuenca de estudio presenta un 30% de ocurrencia de sequía (Anexo 10). En este sentido, se considera que las principales causas de sequías meteorológicas en la cuenca del río Nazas han sido por las alteraciones del ciclo hidrológico así como también, los cambios de uso de suelo en la parte alta de la cuenca, sobreexplotación de recursos forestales y las actividades productivas como la ganadería extensiva (sobrepastoreo); este fenómeno está muy relacionado con las actividades socioeconómicas de la zona, por la alta demanda de agua a



causa del crecimiento poblacional y las actividades económicas como la agricultura de riego y la industria (Esquivel, 2002).

En la cuenca del río Nazas la agricultura es una fuente importante de empleo y de ingresos económicos, las actividades agrícolas de riego y temporal son un sector muy vulnerable ante la presencia de sequías, este hecho tiene gran influencia en su variedad fisiográfica, su ubicación geográfica, la cual gran parte del territorio se encuentra con características áridas y semiáridas, por tal motivo, la vulnerabilidad ante sequía es alta, además de mayor ocurrencia y persistencia de este fenómeno (Velasco *et al.*, 2005).

Finalmente, con base a los resultados obtenidos del análisis de la presencia histórica de sequías en la cuenca del río Nazas se propone que, para mejorar la seguridad hídrica ante la presencia de sequía en la zona. Que la sociedad tenga una perspectiva del fenómeno sequía y se involucre de manera activa y responsable con instituciones de gobierno, ya sea municipal o estatal; con el propósito de un uso racional y eficiente del agua.

Otro aspecto para considerar es el mantenimiento o en su caso construcción de infraestructura de almacenamiento, desde jagüeyes, ollas de captación de agua, captación y recolección de lluvia en viviendas; así mismo, incrementar la eficiencia en el manejo de agua en los distritos de riego e impulsar el reúso del agua tratada y, finalmente, conseguir una buena gobernanza del agua, es decir, que todos los sistemas políticos, legales, socio-económicos e instituciones administrativas tengan mejores tomas de decisiones ante el manejo, eficiencia y desarrollo del recurso hídrico. (FAO, 2017), (Velasco *et al.*, 2005), (Martínez, 2013), (Domínguez, 2006) y (CONAGUA, 2015b).

9. BIBLIOGRAFÍA



- Allen G. R., Pereira S. L., Raes D. y Smith M. 2006. Evapotranspiración del cultivo: guía para la determinación de los requerimientos de agua de los cultivos. Organización de las Naciones Unidas para la Agricultura y la Alimentación (FAO). Roma, Italia. 322p.
- Aparicio M. F. 1989. Fundamentos de hidrología de superficie. Editorial Limusa. México, D. F. 303 p.
- Aruffo E. and Di Carlo P. 2019. Homogenization of instrumental time series of air temperature in Central Italy (1930–2015). *Climate Research*. Vol. 77:193-204.
- Bathke D. J., Prendeville H. R., Jacobs A., Heim R., Thoman R., and Fuchs B. 2019. Defining drought in a temperate rainforest. *American Meteorological Society*. 2665-2668 pp.
- Caussinus H., Mestre O. 2004. Detection and correction of artificial shifts in climate series. *J. Roy. Stat. Soc. Series C53*, 405-425.
- Centro Nacional de Prevención de Desastres (CENAPRED). 2001. Diagnóstico de peligros e identificación de riesgos de desastres en México. Atlas nacional de riesgos de la República Mexicana. México D.F., 232 p.
- Comisión Nacional del Agua (CONAGUA). 2014. Programa de medidas preventivas y de mitigación de la sequía (PMPMS) en el consejo de Cuenca Nazas-Aguanaval. Programa nacional contra la sequía. Torreón Coahuila, 121 p.
- Comisión Nacional del Agua (CONAGUA). 2015. Programa de medidas preventivas y de mitigación de la sequía (PMPMS) en la cuenca Costa-Pacífico-Centro. Programa nacional contra la sequía.
- Comisión Nacional del Agua (CONAGUA). 2015b. Programa de medidas preventivas y de mitigación de la sequía en la cuenca Lerma-Chapala. Organismo de Cuenca Lerma-Santiago-Pacífico. 416 p.
- Comisión Nacional del Agua. 2017. Mapa de los municipios con mayor riesgo a la sequía.
- Comisión Nacional del Agua (CONAGUA). 2018. Estadísticas del agua en México. Secretaría del Medio Ambiente y Recursos Naturales. 306p.
- Comisión Nacional del Agua (CONAGUA). 2018b. Reporte del clima en México julio 2018. Secretaría del Medio Ambiente y Recursos Naturales. 33p.
- Comisión Nacional del Agua (CONAGUA). 2019. Subdirección General de Infraestructura Hidroagrícola. Sistema Nacional de Información del Agua (SINA). Ciudad de México, México.
- Comisión Nacional para el conocimiento y Uso de la Biodiversidad. 2001. Catálogo de metadatos geográficos. Carta Temática de Climas. Escala 1: 1 000 000 Serie I. Ciudad de México, México.



- Comisión Nacional para el conocimiento y Uso de la Biodiversidad. 2008. Catálogo de metadatos geográficos. Carta Temática de Provincias Fisiográficas de México. Escala 1: 1 000 000 Serie I. Ciudad de México, México.
- Coll J., Curley M., Walsh S. and Sweeney J. 2014. Ireland with Homer. In: Eighth Seminar for Homogenization and Quality Control in Climatological Databases and Third Conference on Spatial Interpolation Techniques in Climatology and Meteorology. World Meteorological Organization. pp. 23-45.
- Contreras S.C. 2005. Las sequías en México durante el siglo XIX. Investigaciones Geográficas. Num.56:118-133.
- Chávez, M. J. 2007. Hidrología Superficial. Apuntes del curso. Notas de clase. Departamento de Irrigación, Universidad Autónoma Chapingo, México.
- Dai A. 2011. Characteristics and trends in various forms of the Palmer Drought Severity Index during 1900–2008. Journal of Geophysical Research. Vol. 116: 1-26.
- De Miguel A., Lado J. J., Martínez V., Leal M. y García R. 2009. El ciclo hidrológico: experiencias prácticas para su comprensión. Enseñanza de las Ciencias de la Tierra. Vol. 17: 78-85.
- Domonkos P. 2011. Adapted Caussinus-Mestre Algorithm for Networks of Temperature Series (ACMANT). International Journal of Geosciences. Vol. 2: 293-309.
- Domínguez J. 2006. La gobernanza del agua en México y el reto de la adaptación en zonas urbanas: el caso de la Ciudad de México. Anuario de Espacios Urbanos. Vol. :273-296.
- Escalante S. C. 2003. La vulnerabilidad ante los extremos: la sequía. Ingeniería Hidráulica en México. Vol. 28: 133-155.
- Esquivel E. E. 2002. Lluvia y sequía en el norte de México. Un análisis de la precipitación histórica en Chihuahua. Secretaría de Medio Ambiente y Recursos Naturales. Gaceta Ecológica, núm. 65, México D.F., pp 24-42.
- Esquivel A. G., Cerano P. J., Sánchez C. I., Velásquez V. M., Flores L. F. y Bueno H.P. 2019. Análisis temporal de sequías (1922-2016) en la cuenca alta del río Nazas usando SPI y su relación con ENSO. Instituto Mexicano de Tecnología del Agua. Vol. 10(3):126-153.
- FAO. 2017. Mitigación y respuestas ante sequías. En: Conferencia regional de América Latina y el Caribe (ALC) para la gestión y preparación ante la sequía.
- Florescano M.E., Sancho C.J. y Perz. G. D. 1980. Las sequías en México: historia, características y efectos. Comercio Exterior. Vol. 30(7):747-757.
- Freitas L., Gonzalez P. M., Caramelo L., Mendes M. and Nunes F. L. 2013. Homogeneity of monthly air temperature in Portugal with HOMER and MASH. IDÓJARÁS. Vol. 117:69-90.



- García J. F., Fuentes M. O. y Matías R. L. 2002. Serie Fascículo: Sequías. Centro Nacional de Prevención de Desastres. Secretaria de Gobernación. México. D.F. 39 p.
- García, E. 2004. Modificaciones al Sistema de Clasificación Climática de Köppen (Para adaptarlo a las condiciones de la República Mexicana). Instituto de Geografía- Universidad Nacional Autónoma de México. México
- Guttman N. b. 1998. Comparing the palmer drought index and the sandardized precipitation index. Journal Of The American Water Resources Association. Vol. 34: 113-121.
- Guijarro J. A. 2004. CLIMATOL: software libre para la depuración y homogeneización de datos climatológicos. Asociación Española de Climatología. Ponencia presentada en: IV Congreso de la Asociación Española de Climatología "El Clima entre el Mar y la Montaña". 493-502 pp.
- IPCC, 2013: Glosario [Planton, S. (ed.)]. En: Cambio Climático 2013. Bases físicas. Contribución del Grupo de trabajo al Quinto Informe de Evaluación del Grupo Intergubernamental de Expertos sobre el Cambio Climático [Stocker, T.F., D. Qin, G.-K. Plattner, M. Tignor, S.K. Allen, J. Boschung, A. Nauels, Y. Xia, V. Bex y P.M. Midgley (eds.)]. Cambridge University Press, Cambridge, Reino Unido y Nueva York, NY, Estados Unidos de América.
- Instituto Interamericano de Cooperación para la Agricultura (IICA). 2013. Cambió el clima: herramienta para abordar la adaptación al cambio climático. Montevideo, Uruguay. 109p.
- Instituto Nacional de Ecología y Cambio Climático (INECC). 2018. ¿Qué es el clima? Secretaria del Medio Ambiente y Recursos Naturales. <https://www.gob.mx/inecc/acciones-y-programas/que-es-el-clima>.
- Instituto Nacional de Estadística y Geografía. 2001. Conjunto de datos vectoriales Fisiográficos. Continuo Nacional. Escala 1:1 000 000. Serie I (Subprovincias fisiográficas). Aguascalientes, Ags., México.
- Instituto Nacional de Estadística y Geografía. 2001b. Conjunto de datos vectoriales Fisiográficos. Continuo Nacional. Escala 1:1 000 000. Serie I (Sistema topoformas). Aguascalientes, Ags., México.
- Instituto Nacional de Estadística y Geografía. 2008. Características edafológicas, fisiográficas, climáticas e hidrográficas de México. Dirección de Capacitación. Aguascalientes, Ags., México.
- Instituto Nacional de Estadística y Geografía. 2011. Inventario Nacional de Fenómenos Geológicos. Escala 1: 250 000. Aguascalientes, Ags., México.
- Instituto Nacional de Estadística y Geografía. 2014. Conjunto de datos vectoriales edafológico. Continuo Nacional. Escala 1: 250 000. Serie II. Aguascalientes, Ags., México.



- Instituto Nacional de Estadística y Geografía. 2017. Conjunto de datos vectoriales uso de suelo y vegetación. Continuo Nacional. Escala 1: 250 000. Serie VI. Aguascalientes, Ags., México.
- Ley General de Protección Civil. 2012. Secretaria de Gobernación. Diario Oficial de la Federación 19p.
- López M. j., Morán T. E., Vicente S. S., Bazo J., Azorin M. C., Revuelto J., Sánchez L. A., Navarro S. F., Aguilar E. and Chura O. 2016. Recent temperature variability and change in the Altiplano of Bolivia and Peru. *International Journal of Climatology*. Vol. 36: 1773-1796.
- Maderey R. L. E. y Jiménez R. A. 2005. Principios de hidrogeografía: estudio del ciclo hidrológico. Instituto de Geografía. Universidad Nacional Autónoma de México. 100p.
- Martínez A. P. F. y Patiño G. C. 2012. Efectos del cambio climático en la disponibilidad de agua en México. *Tecnología y Ciencias del Agua*. Vol. 3:5-20.
- Martínez-Austria O. 2013. Los retos de la seguridad hídrica. *Tecnología y Ciencias del Agua*. Vol. 4(5):163-180.
- Marcolini G., Koch R., Chimani B., Schöner W., Bellin A., Disse M., Chiogna G. 2019. Evaluation of homogenization methods for seasonal snow depth data in the Austrian Alps, 1930–2010. *International Journal of Climatology*. Vol. 39: 4514-4530.
- Mestre, O., Domonkos, P., Picard, F., Auer, I., Robin, S., Lebarbier, É., Boehm, R., Aguilar, E., Guijarro, J., Vertachnik, G., Klancar, M., Dubuisson, B., Stepanek, P. (2013). HOMER: a homogenization software - methods and applications. *Időjárás*. vol. 117 (1), 47 - 67.
- Mishra K. A. y Singh P. V. 2010. A Review of drought concepts. *Journal of Hydrology*. Vol. 391: 202-216.
- Morales G. A., Olcina C. J. y Rico A. A. 2000. Diferentes Percepciones de la Sequía en España: Adaptación, Catastrofismo e Intentos e Corrección. *Investigaciones Geográficas (Esp)*. Num. 23: 5-46.
- McEvoy D. J., Huntington J. L., Abatzoglou J. T. y Edwards L.M. 2012. An Evaluation of Multiscalar Drought Indices in Nevada and Eastern California. *Earth Interactions*. Vol. 16: 1-18.
- Mckee T. B., Doesken N. J. y Kleist. 1993. The relationship of drought frequency and duration to time scales. En: 8th Conference on Applied Climatology. Anaheim, California.
- Noone S., Murphy C., Coll J., Matthews T., Mullan D., Wilby L. and Walsh S. 2015. Homogenization and analysis of an expanded long-term monthly rainfall network for the Island of Ireland (1850–2010). *International Journal of Climatology*. Vol. 36:2837-2853.



- Organización Meteorológica Mundial (OMM). 2012. Glosario Hidrológico Internacional. Organización de las Naciones Unidas para la Educación, la Ciencia y la Cultura. 471 p.
- Organización Meteorológica Mundial (OMM) y Asociación Mundial para el Agua. 2016. Manual de indicadores e índices de sequía (M. Svoboda y B.A. Fuchs). Programa de gestión integrada de sequías, Serie 2 de herramientas y directrices para la gestión integrada de sequías. Ginebra. 54 p.
- Organización de las Naciones Unidas para la Alimentación y la Agricultura (FAO). 2014. Base referencial mundial del recurso suelo 2014. Sistema internacional de clasificación de suelos para la nomenclatura de suelos y la creación de leyendas de mapas de suelos. Informes sobre recursos mundiales de suelos Roma, Italia. 106 p.
- Ortega-Gaucin, D. 2012. Sequía en Nuevo León: vulnerabilidad, impactos y estrategias de mitigación. Instituto del Agua de Nuevo León. Apodaca, N.L., 222 p.
- Ortega G. D. y Velasco I. 2013. Aspectos socioeconómicos y ambientales de las sequías en México. Aqua-LAC (Revista del Programa Hidrológico Internacional para América Latina y el Caribe). Vol. 5:78-90.
- Ortega-Gaucin D., Velasco V.I., Gúitron R.A., Arreguin C.F. y López P.M. 2014. La Gestión de Sequías en México: Avances y Retos. XXII Congreso Nacional de Hidraulica. Puerto Vallarta, Jalisco, México. 7p.
- Palmer W. C. 1965: Meteorological drought. Office of Climatology, Weather Bureau, Washington, D.C. 58 pp.
- Paulo A. A y Pereira L. S. 2006. Drought Concepts and Characterization: Comparing Drought Indices Applied at Local and Regional Scales. International Water Resources Association. Vol. 31: 37-49.
- Peña G. M., Gámiz F. S. R., Castro D. Y. y Esteban P. M.J. 2016. Análisis Comparativo de Índices de Sequía en Andalucía Para el Periodo 1901-2012. Cuaderno de Invetigaciones Geografica. Vol. 42: 67-88.
- Pérez Z. N., Sigró J., Domonkos P. and Ashcroft L. 2015. Comparison of HOMER and ACMANT homogenization methods using a central Pyrenees temperature dataset. Advances in Science & Research. Vol. 12:111-119.
- Picard F., Lebarbier E., Hoebeke M., Rigail G., Thiam B., Robin S. 2011. Joint segmentation, calling and normalization of multiple CGH profiles. Biostatistics. Vol. 12: 413-428.
- Ravelo, A.C., Sanz R. R. y Douriet C. J. 2014. Detección, evaluación y pronóstico de las sequías en la región del Organismo de Cuenca Pacífico Norte, México. AGRISCIENTIA. Vol. 31: 11-24.
- Ravelo C. A., Planchuelo M. A., Aroche R., Douriet C. J., Hallack A. M., Jimenez R., Maureira H., Peña P. T., Tiscornia G., Zanvettor R. y Zimmermann R. 2016.



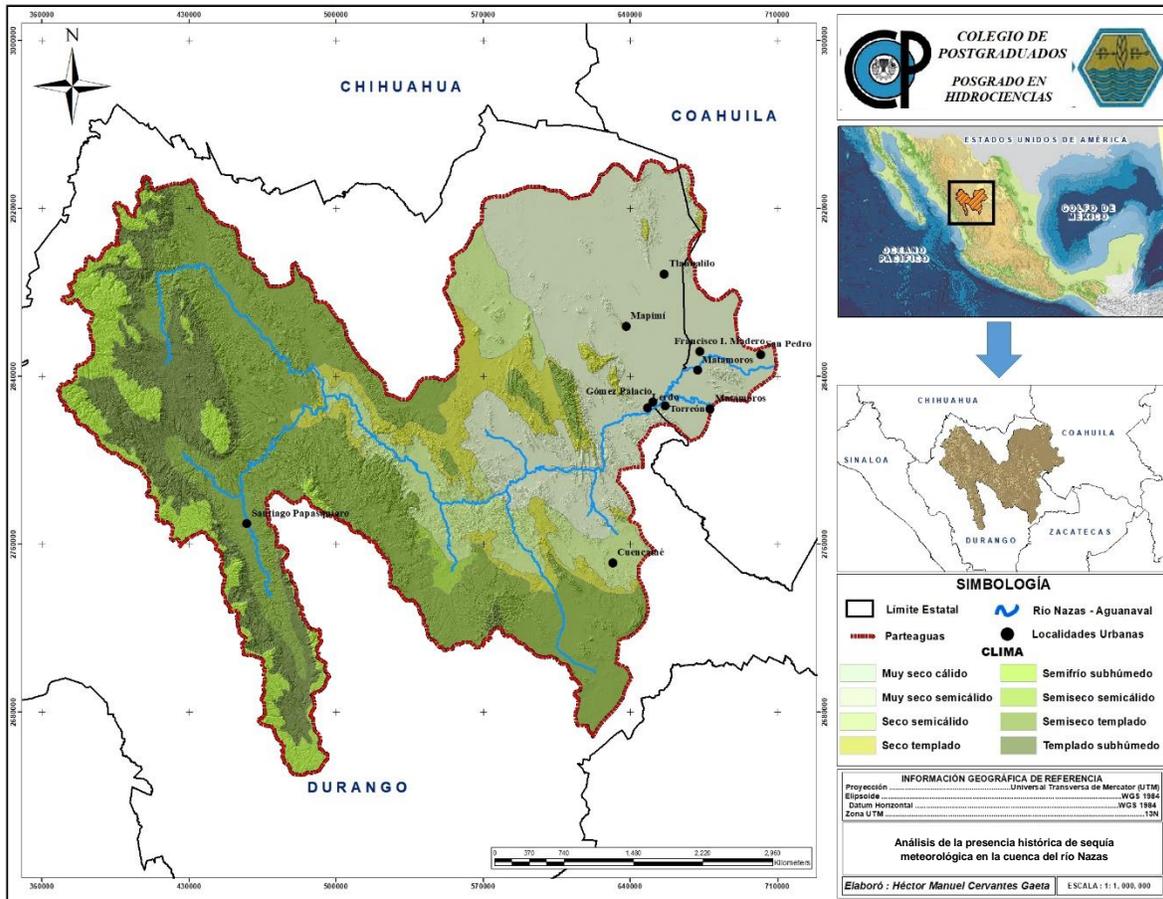
- Monitoreo y Evaluación de las Sequías en América Centra. European Union. 55p.
- Rodríguez J. R., Benito C. Á., y Portela L. A. 2004. Meteorología y Climatología. Fundación Española para la Ciencia y la Tecnología. 142p.
- Serrano B. L., Vicente-Serrano S. M., Flores M. H. Tijerina C. L. y Vázquez S.D. 2016. Variabilidad Espacio-Temporal de las Sequías en la Cuenca Pacifico Norte de México (1961-2010). Cuadernos de Investigación Geográfica. Vol. 42:185-204.
- Servicio Meteorológico Nacional (SMN). Glosario Técnico. Comisión Nacional del Agua. <https://smn.conagua.gob.mx/es/smn/glosario>
- Steinemann A., Iacobellis S. y Cayan D. 2015. Developing and Evaluating Drought Indicators for Decision-Making. Journal of Hydrometeorology. Vol. 16: 1793-1803.
- Steinemann A. 2003. Drought Indicators And Triggers: A Stochastic Approach To Evaluation. Journal Of The American Water Resources Association (JAWRA). 39:1217-1233.
- Thornthwaite, C. W. (1948). An approach toward a rational classification of climate. Geographical Review, 38, 55-94.
- Trenberth, K. E., L. Smith, T. Qian, A. Dai, and J. Fasullo, 2007: Estimates of the Global Water Budget and Its Annual Cycle Using Observational and Model Data. J. Hydrometeor., 8, 758–769, <https://doi.org/10.1175/JHM600.1>.
- Useros F. J. 2013. El cambio climático: sus causas y efectos medio ambientales. Anales De La Real Academia de Medicina y Cirugía de Valladolid. 50: 71-98.
- Valiente O. M. 2001. Sequía: definiciones, tipologías y métodos de cuantificación. Investigaciones Geográficas. Num. 26: 59-80.
- Velasco I., Ochoa L. y Gutiérrez C. 2005. Sequía, un problema de perspectiva y gestión. Región y Sociedad. Vol. 17: 35-71.
- Vicente-Serrano S. M., Aguilar E., Martínez R., Hernández M. N., Azorín M. C., Sánchez L. A., Revuelto J., Berguería S., Nieto J. J., Drumond A., Gimero L. and Nieto R. 2017. The complex influence of ENSO on droughts in Ecuador. Clim Dyn. Vol. 48:405-427.
- Vicente-Serrano S. M., Bergueria S., Lorenzo L. J., Camarero J. J., López M. J., Azorín M. C., Revuelto J., Morán T. E. y Sánchez L. A., 2012. Análisis comparativo de diferentes índices de sequía para aplicaciones ecológicas, agrícolas e hidrológicas. En: Cambio climático. Extremos e impactos. 8º Congreso Internacional de la Asociación Española de Climatología (AEC) Salamanca, España. pp 679-689.
- Vicente-Serrano S. M., Bergueria S., Lorenzo L. J., Camarero J. J., López M. J., Azorín M. C., Revuelto J., Morán T. E. y Sánchez L. A., 2012b. Performance of Drought



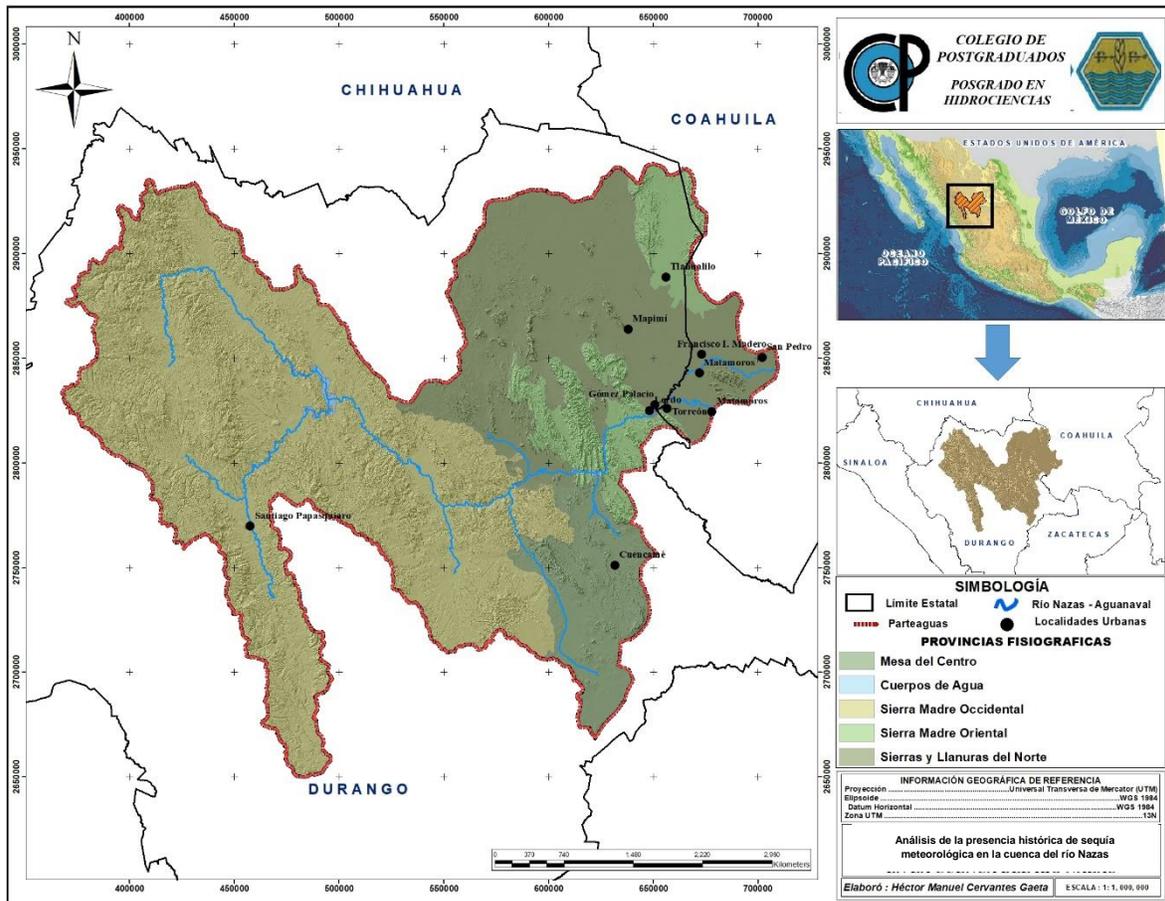
- Indices for Ecological, Agricultural, and Hydrological Applications. *Earth Interactions*. Vol. 16:1-27.
- Vicente-Serrano S. M., Bergueria S. y López M. J. 2010. A Multiscalar Drought Index Sensitive to Global Warming: The Standardized Precipitation Evapotranspiration Index (SPEI). *Journal of Climate*. Vol. 23: 1696-1718.
- Wang L., Yu H., Yang M., Yang R., Gao R. y Wang Y. 2019. A drought index: The standardized precipitation evapotranspiration runoff index. *Journal of hydrology*. Vol. 571:651-668.
- Wilhite D. A y Glantz H. M. 1985. Understanding the Drought Phenomenon: The Role of Definitions. *Water International*. Vol. 10: 111–120.
- Wilhite D. A. 2000. Drought as a Natural Hazard: Concepts and Definitions. *Drought: a Global Assessment*. New York, N.Y. Vol. 1: 3-18.
- Wilhite D. A. 2011. "Quantification of Agricultural Drought for Effective Drought Mitigation and Preparedness: Key Issues and Challenges. *Drought Mitigation Center Faculty Publications*. Vol. 82: 13-21.
- World Meteorological Organization, 2011: Guide to Climatological Practices, WMO/No. 100., Geneva.
- World Meteorological Organization. 2018. Guidance on the homogenization of climate station data. *EarthArXiv*. 83p.
- Zargar A., Sadiq R., Naser B y Khan F. 2011. A review of drought índices. *Environ Rev*. Vol. 19: 333-349.

ANEXOS

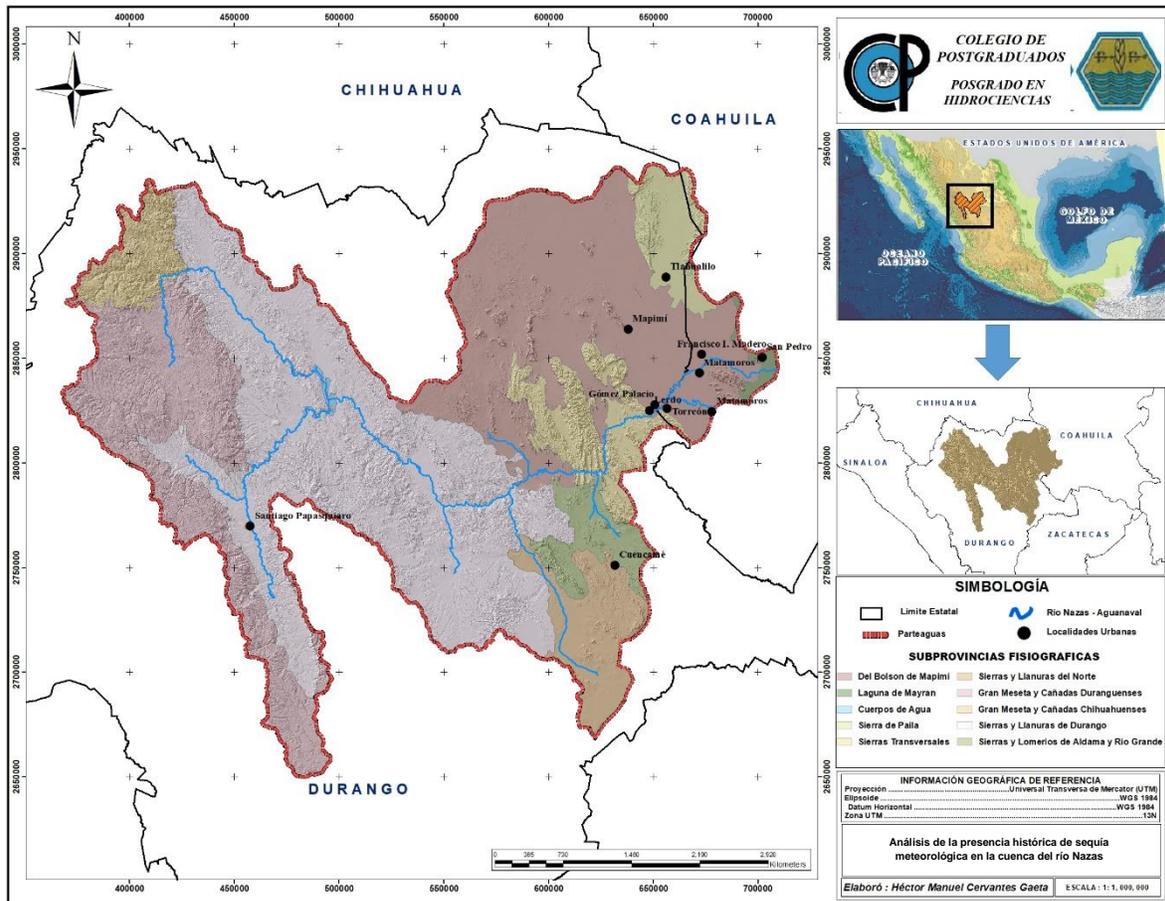
Anexo 1. Clima en la cuenca del río Nazas.



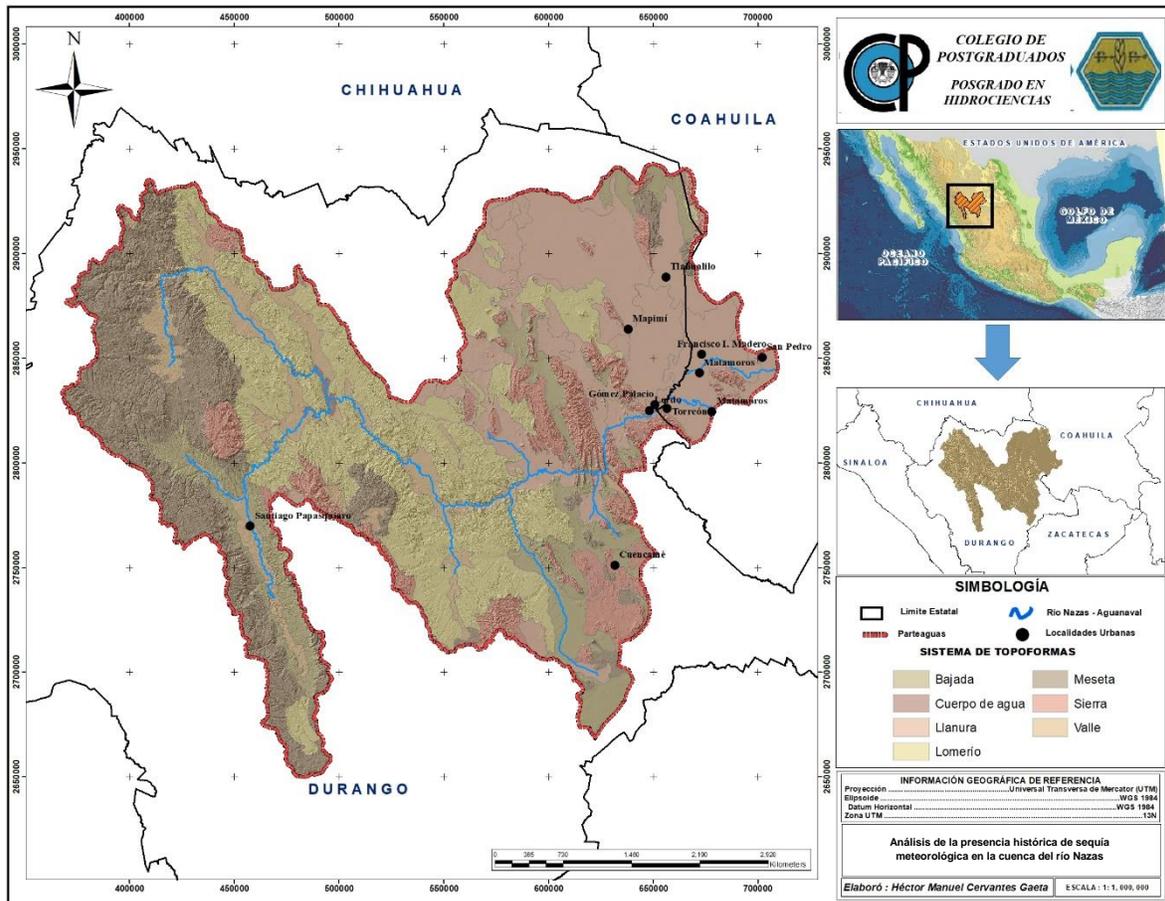
Anexo 2. Provincias fisiográficas en la cuenca del río Nazas.



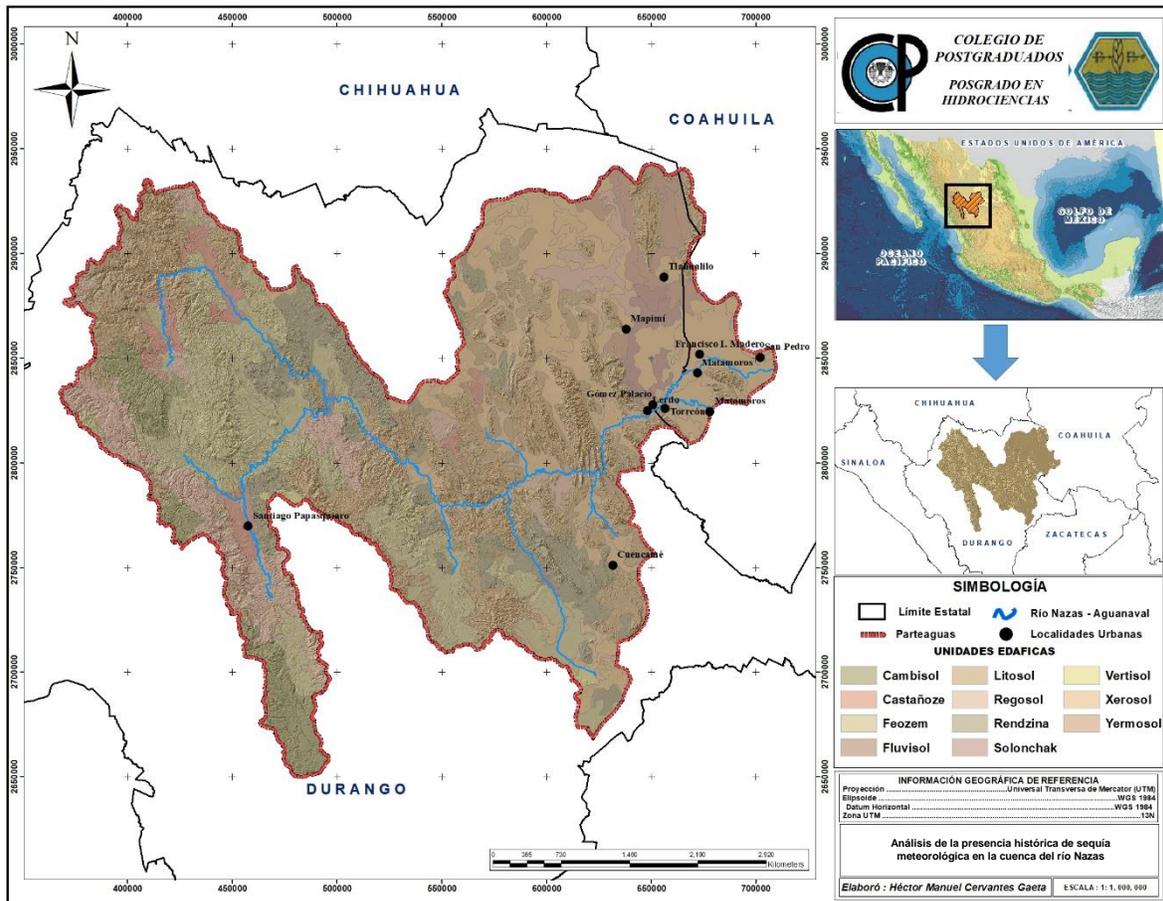
Anexo 3. Subprovincias fisiográficas en la cuenca del río Nazas.



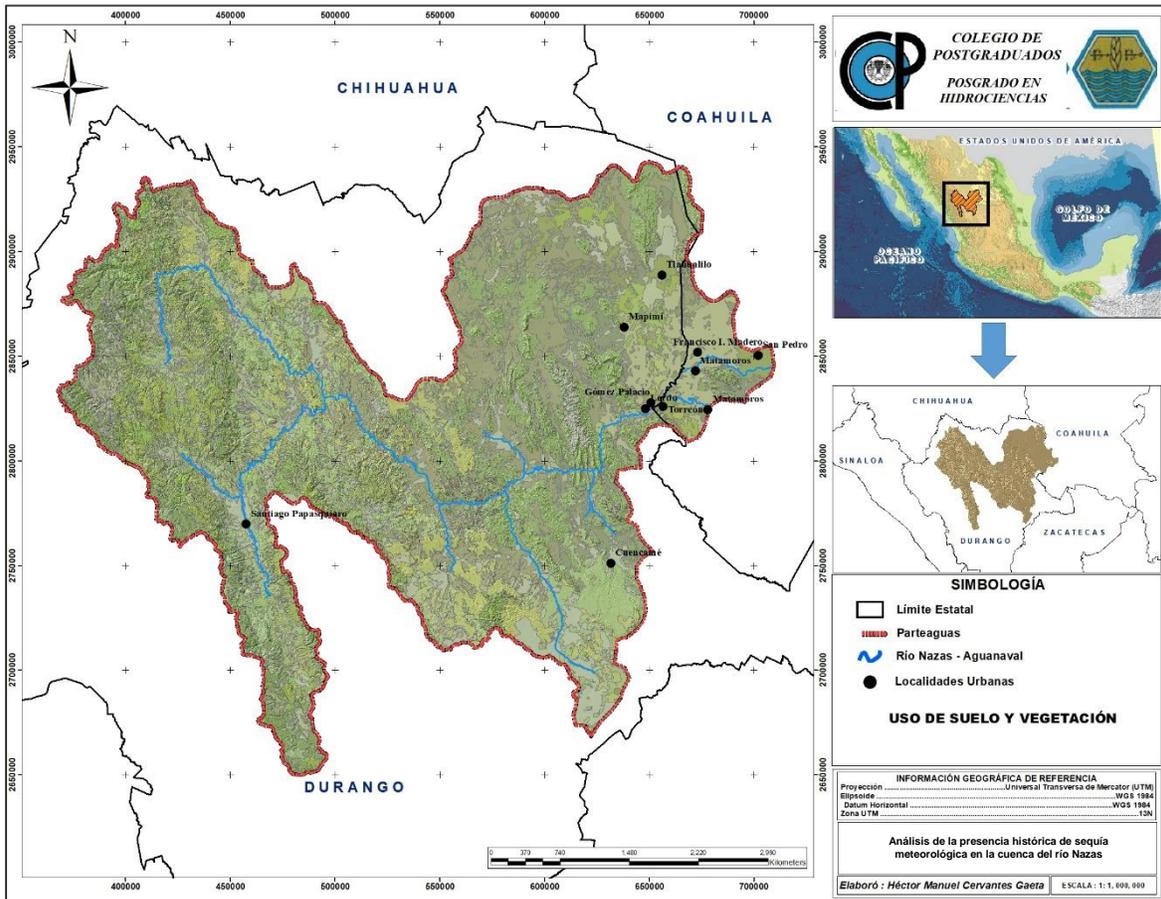
Anexo 4. Sistemas de topofomas en la cuenca del río Nazas.



Anexo 5. Unidades edafológicas en la cuenca del río Nazas.

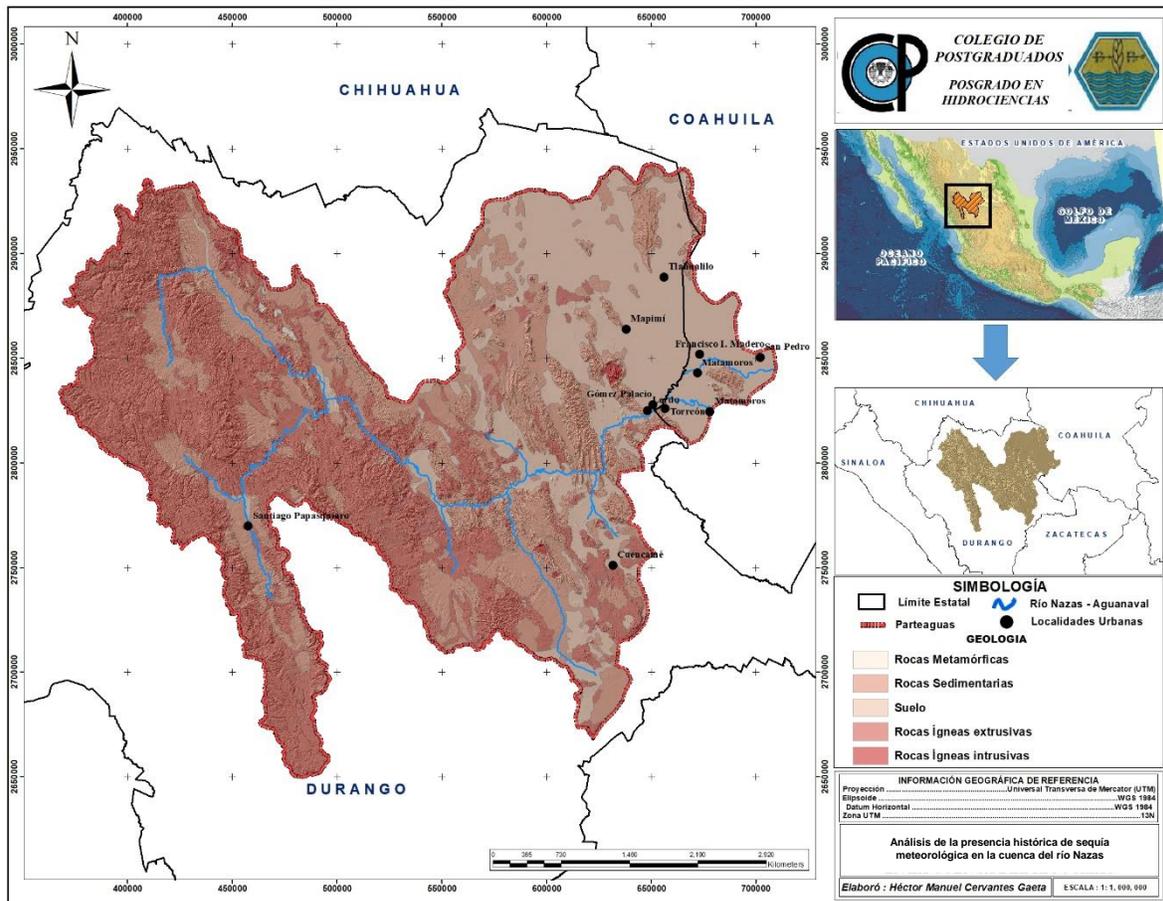


Anexo 6. Uso de suelo y Vegetación en la cuenca del río Nazas.

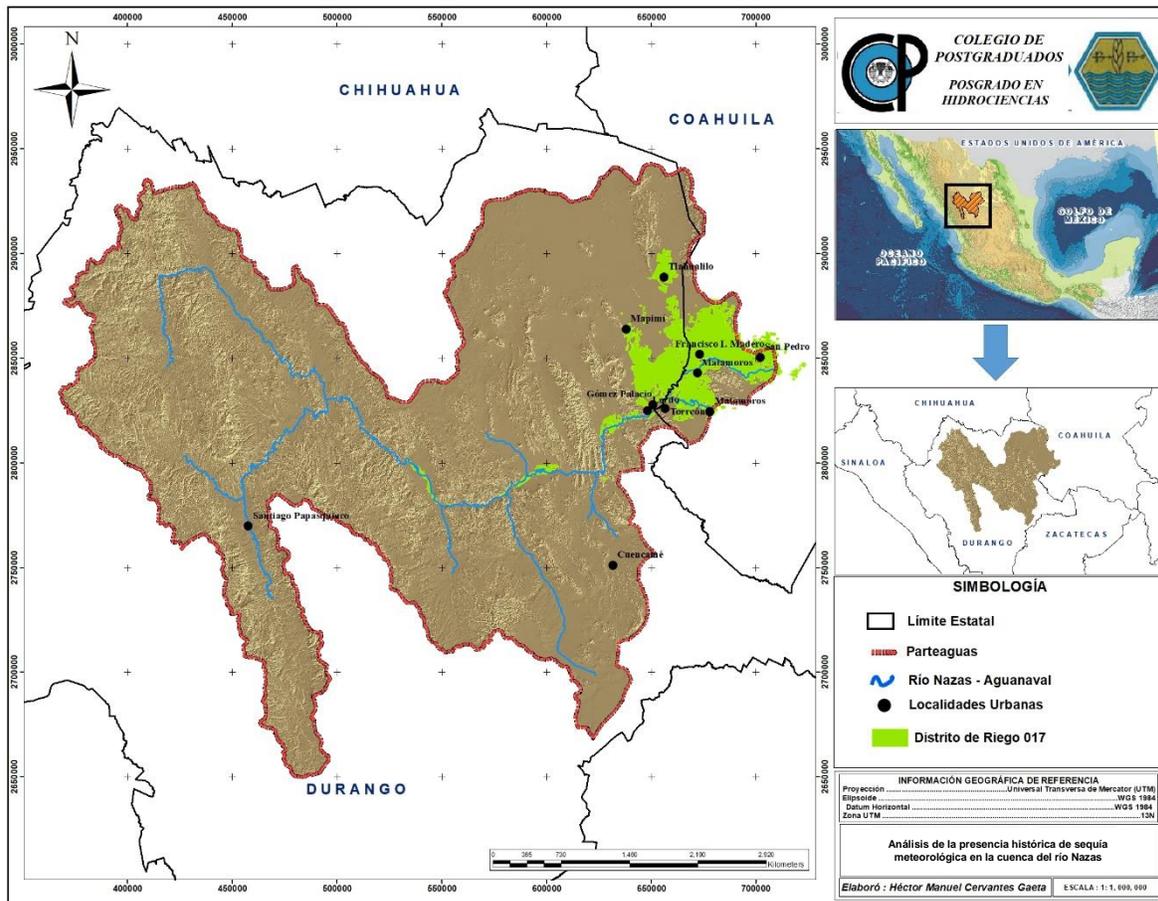


SIMBOLOGIA		
AGRICULTURA DE RIEGO ANUAL	CUERPO DE AGUA	VEGETACION SECUNDARIA ARBOREA DE BOSQUE DE PINO
AGRICULTURA DE RIEGO ANUAL Y PERMANENTE	DESPROVISTO DE VEGETACION	VEGETACION SECUNDARIA ARBOREA DE BOSQUE DE PINO-ENCINO
AGRICULTURA DE RIEGO ANUAL Y SEMIPERMANENTE	MATORRAL CRASICAULE	VEGETACION SECUNDARIA ARBUSTIVA DE BOSQUE DE ENCINO
AGRICULTURA DE RIEGO PERMANENTE	MATORRAL DESERTICO MICROFILO	VEGETACION SECUNDARIA ARBUSTIVA DE BOSQUE DE ENCINO-PINO
AGRICULTURA DE RIEGO SEMIPERMANENTE	MATORRAL DESERTICO ROSETOFILO	VEGETACION SECUNDARIA ARBUSTIVA DE BOSQUE DE MEZQUITE
AGRICULTURA DE RIEGO SEMIPERMANENTE Y PERMANENTE	MATORRAL SUBMONTANO	VEGETACION SECUNDARIA ARBUSTIVA DE BOSQUE DE PINO
AGRICULTURA DE TEMPORAL ANUAL	MEZQUITAL XEROFILO	VEGETACION SECUNDARIA ARBUSTIVA DE BOSQUE DE PINO-ENCINO
AGRICULTURA DE TEMPORAL PERMANENTE	PASTIZAL HALOFILO	VEGETACION SECUNDARIA ARBUSTIVA DE BOSQUE DE TASCATE
ASENTAMIENTOS HUMANOS	PASTIZAL INDUCIDO	VEGETACION SECUNDARIA ARBUSTIVA DE MATORRAL CRASICAULE
BOSQUE DE AYARIN	PASTIZAL NATURAL	VEGETACION SECUNDARIA ARBUSTIVA DE MATORRAL DESERTICO MICROFILO
BOSQUE DE ENCINO	SIN VEGETACION APARENTE	VEGETACION SECUNDARIA ARBUSTIVA DE MATORRAL DESERTICO ROSETOFILO
BOSQUE DE ENCINO-PINO	VEGETACION DE DESIERTOS ARENOSOS	VEGETACION SECUNDARIA ARBUSTIVA DE PASTIZAL HALOFILO
BOSQUE DE MEZQUITE	VEGETACION GIPSOFILA	VEGETACION SECUNDARIA ARBUSTIVA DE PASTIZAL NATURAL
BOSQUE DE PINO	VEGETACION HALOFILA XEROFILO	VEGETACION SECUNDARIA ARBUSTIVA DE VEGETACION DE DESIERTOS ARENOSOS
BOSQUE DE PINO-ENCINO	VEGETACION SECUNDARIA ARBOREA DE BOSQUE DE AYARIN	VEGETACION SECUNDARIA ARBUSTIVA DE VEGETACION HALOFILA XEROFILO
BOSQUE DE TASCATE	VEGETACION SECUNDARIA ARBOREA DE BOSQUE DE ENCINO	VEGETACION SECUNDARIA HERBACEA DE BOSQUE DE PINO
CHAPARRAL	VEGETACION SECUNDARIA ARBOREA DE BOSQUE DE ENCINO-PINO	ZONA URBANA

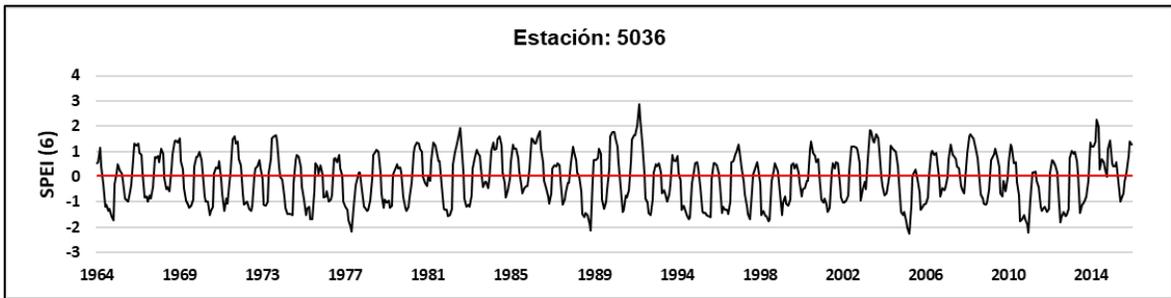
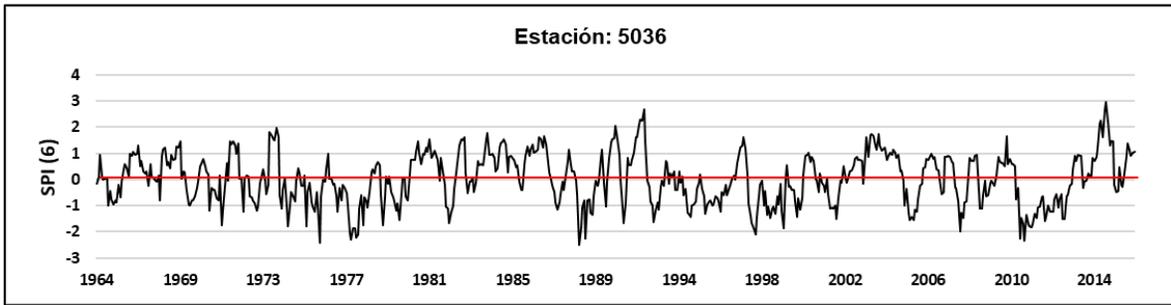
Anexo 7. Geología en la cuenca del río Nazas.



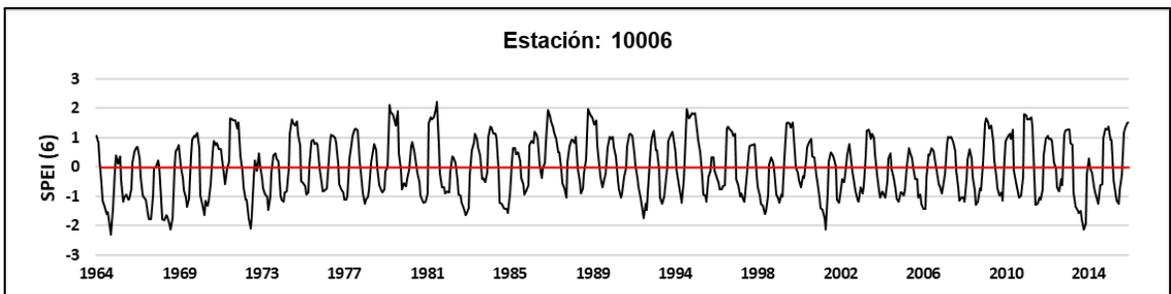
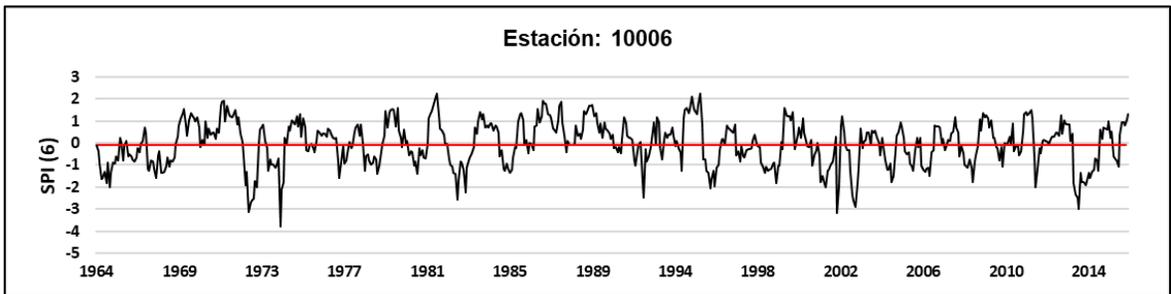
Anexo 8. Distrito de riego 017 en la cuenca del río Nazas.



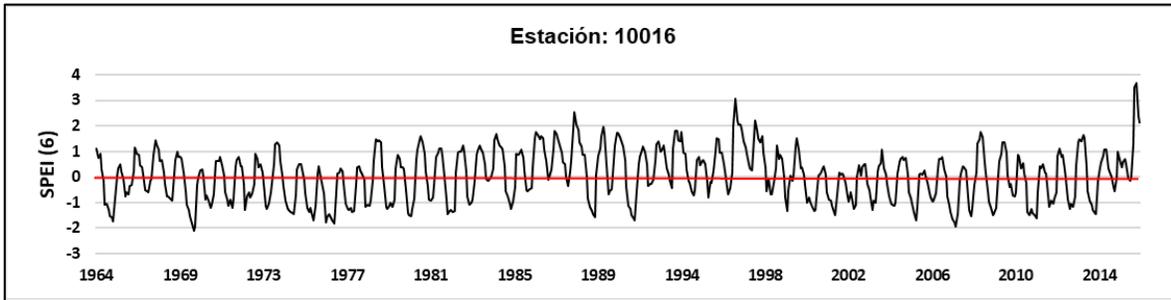
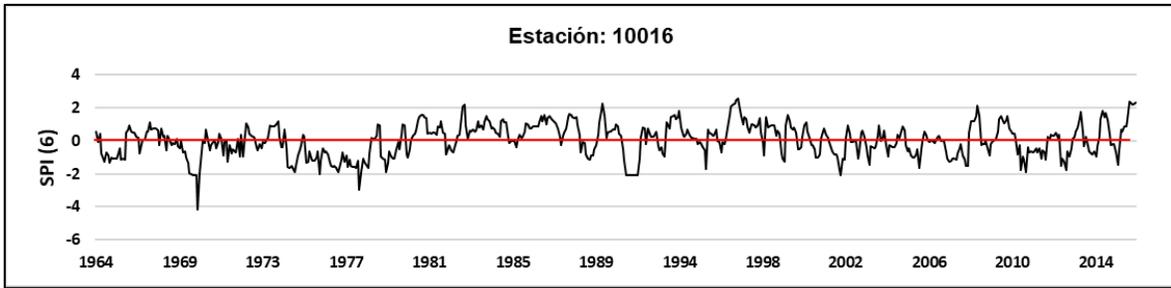
Anexo 9. SPI y SPEI con escala temporal de seis meses.



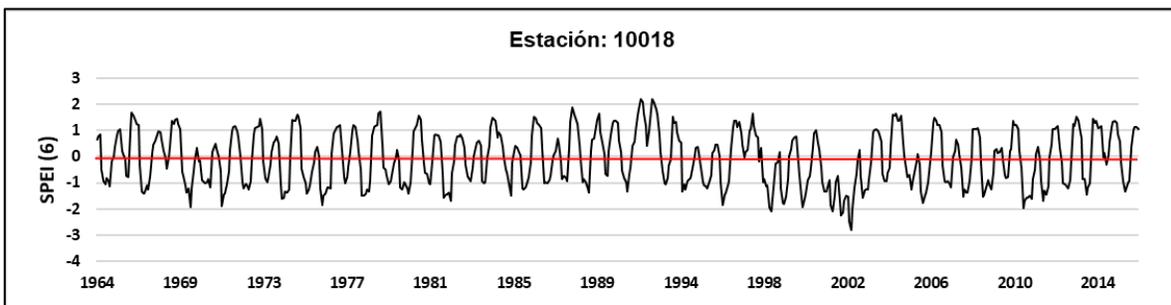
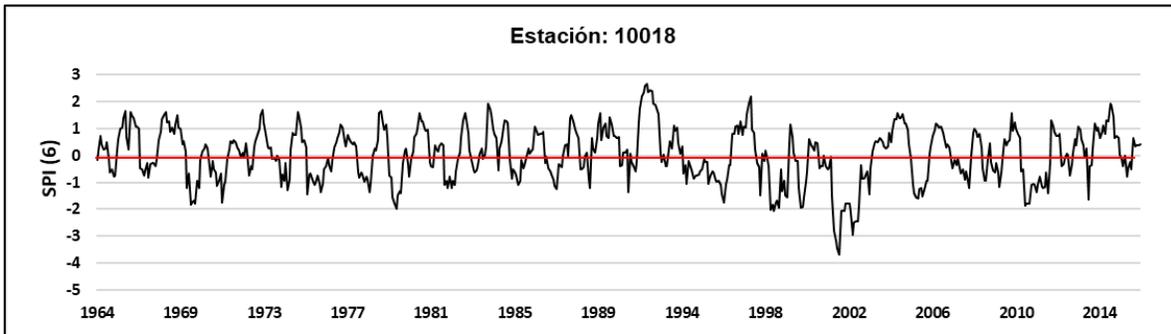
Estación 5036, SPI y SPEI con escala temporal 6 meses.



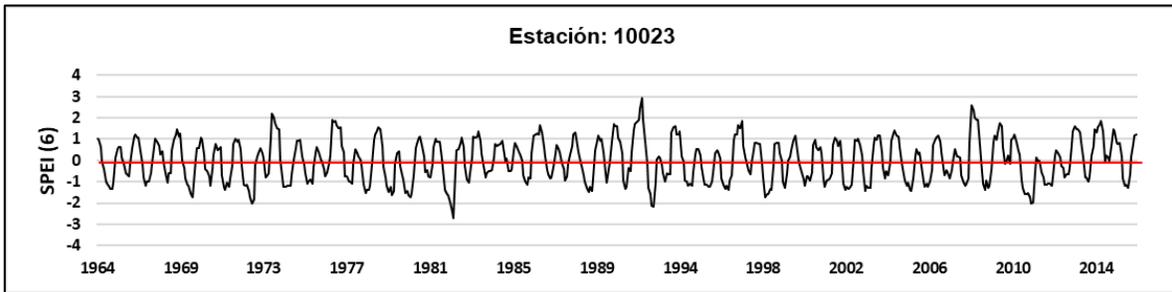
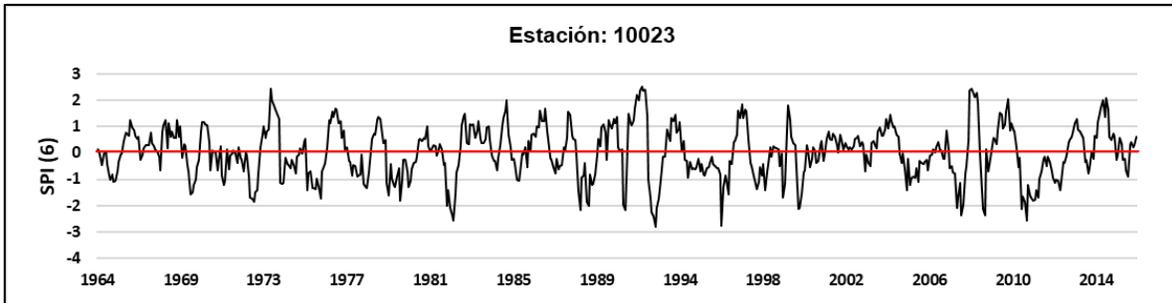
Estación 10006, SPI y SPEI con escala temporal 6 meses.



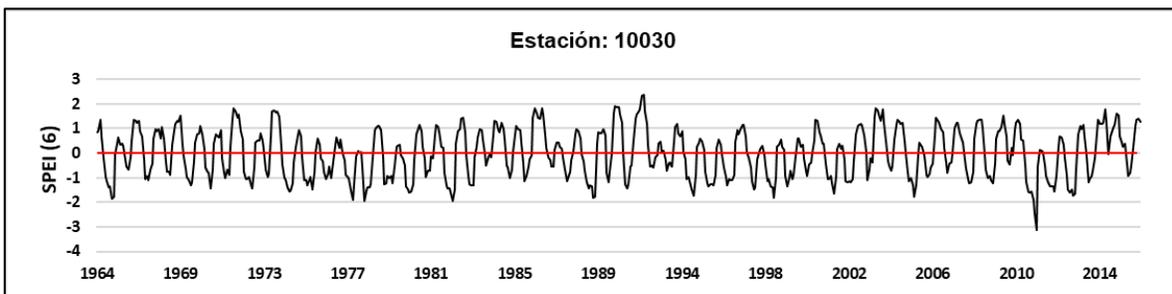
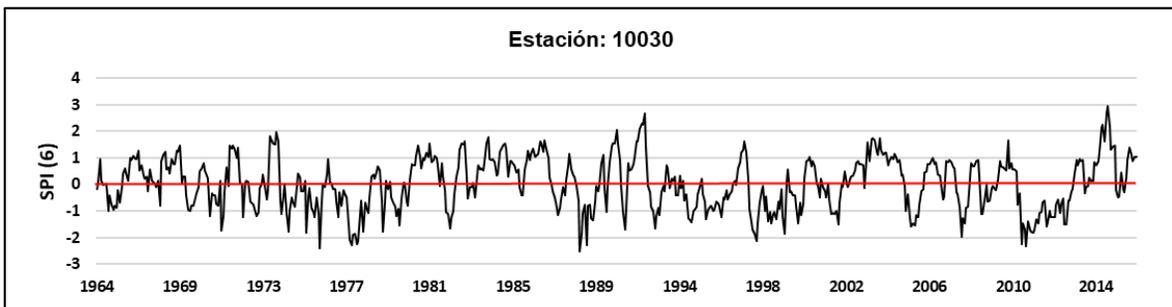
Estación 10016, SPI y SPEI con escala temporal 6 meses.



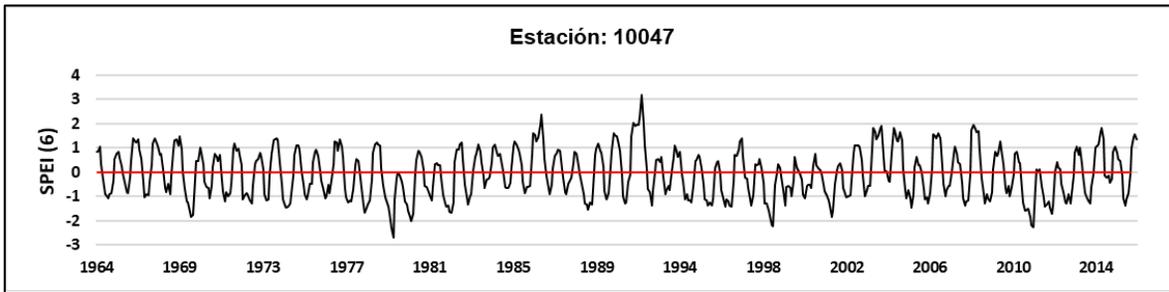
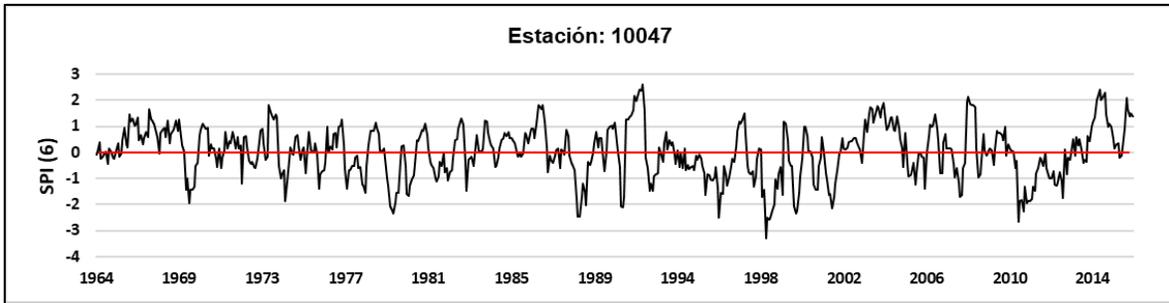
Estación 10018, SPI y SPEI con escala temporal 6 meses.



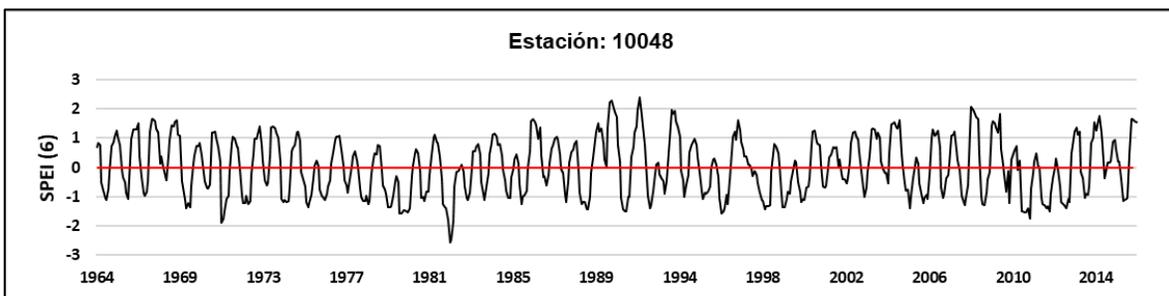
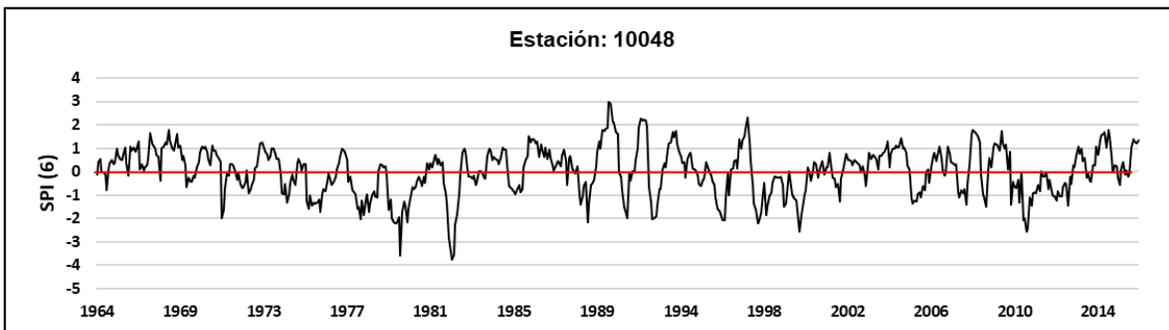
Estación 10023, SPI y SPEI con escala temporal 6 meses.



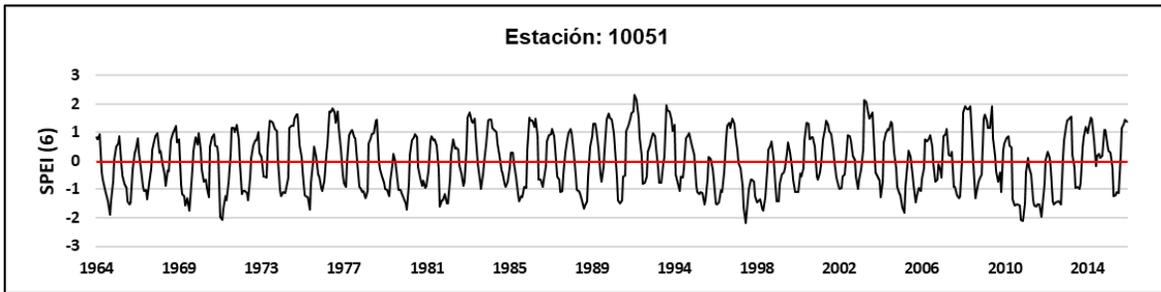
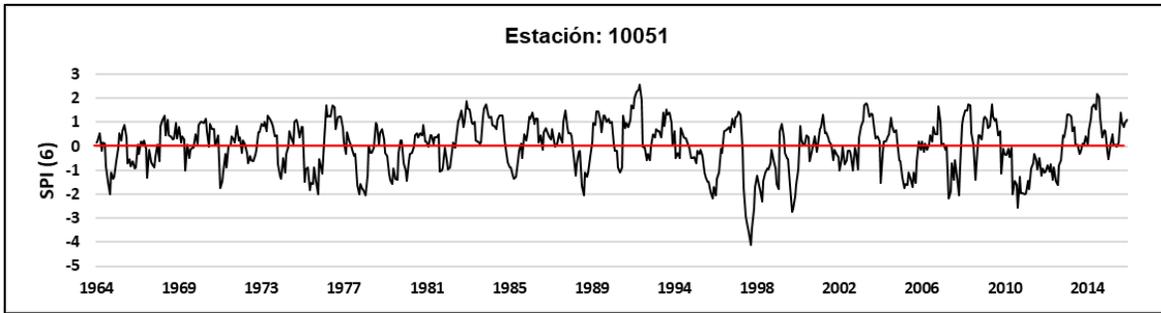
Estación 10030, SPI y SPEI con escala temporal 6 meses.



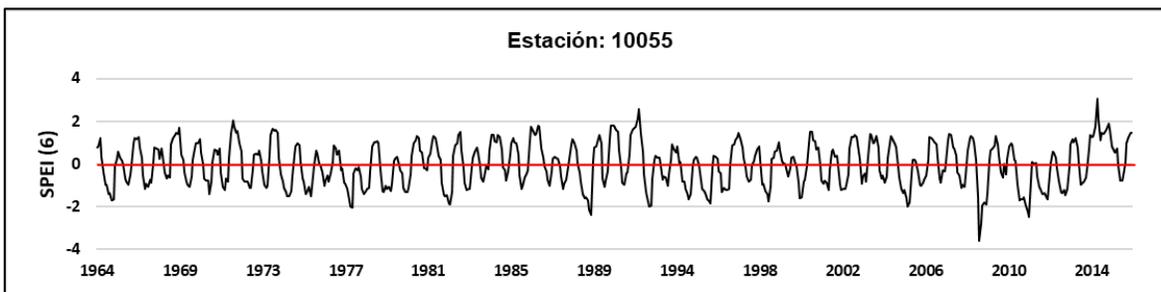
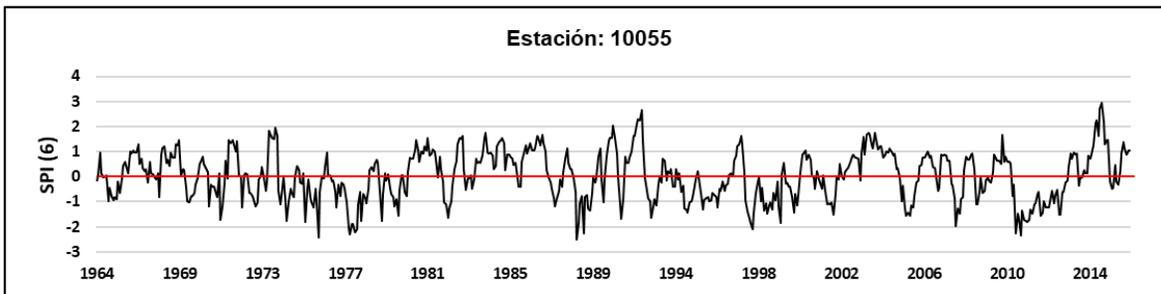
Estación 10047, SPI y SPEI con escala temporal 6 meses.



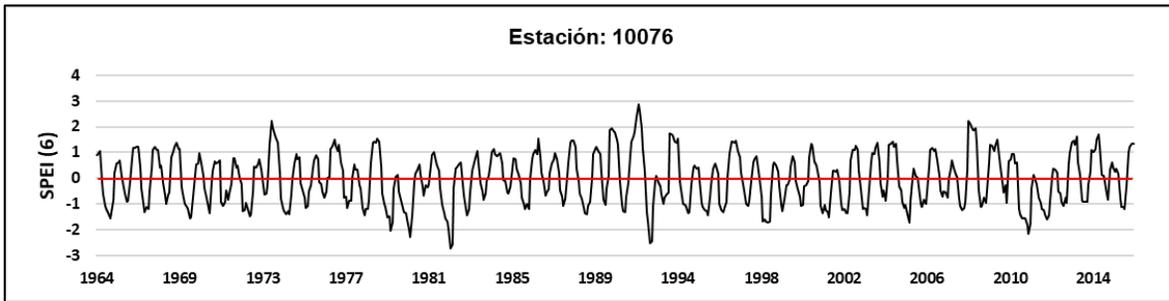
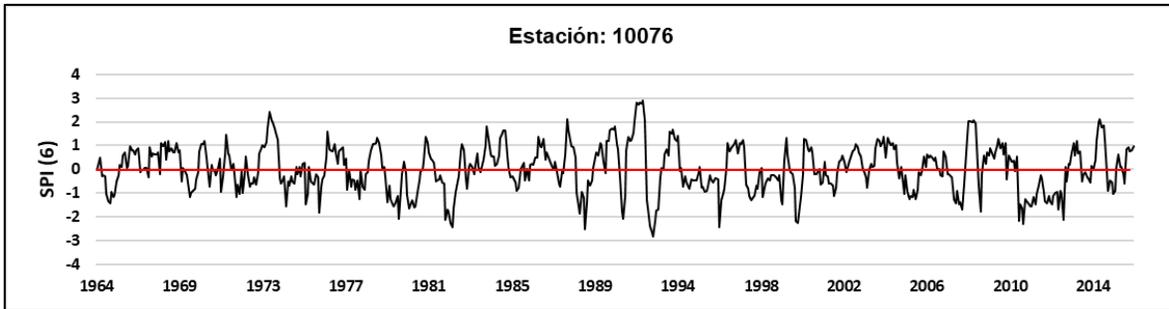
Estación 10048, SPI y SPEI con escala temporal 6 meses.



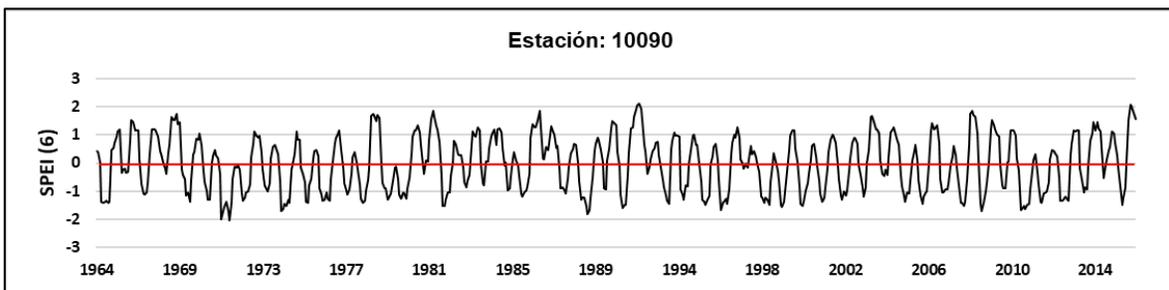
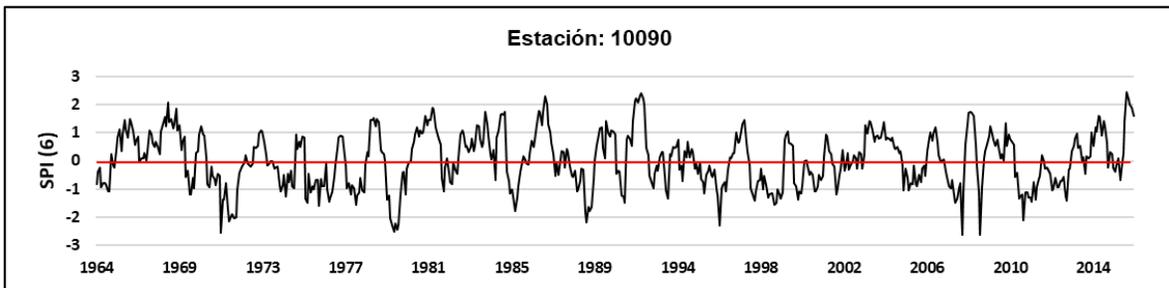
Estación 10051, SPI y SPEI con escala temporal 6 meses.



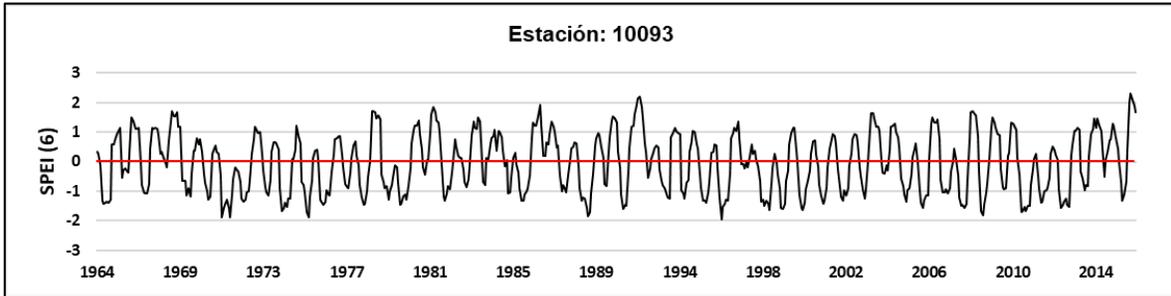
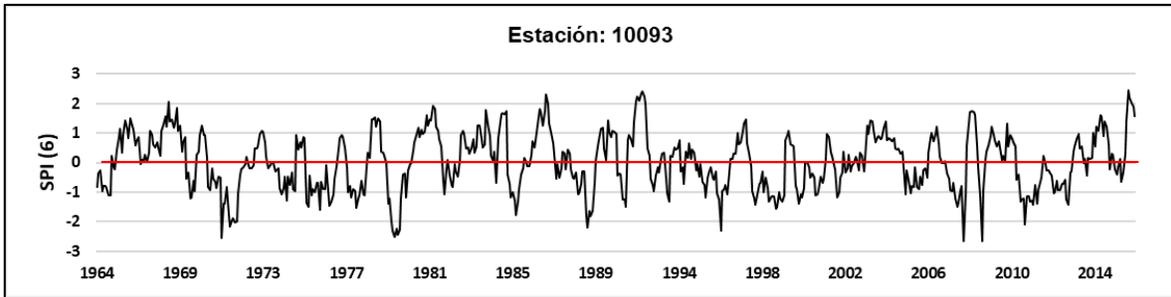
Estación 10055, SPI y SPEI con escala temporal 6 meses.



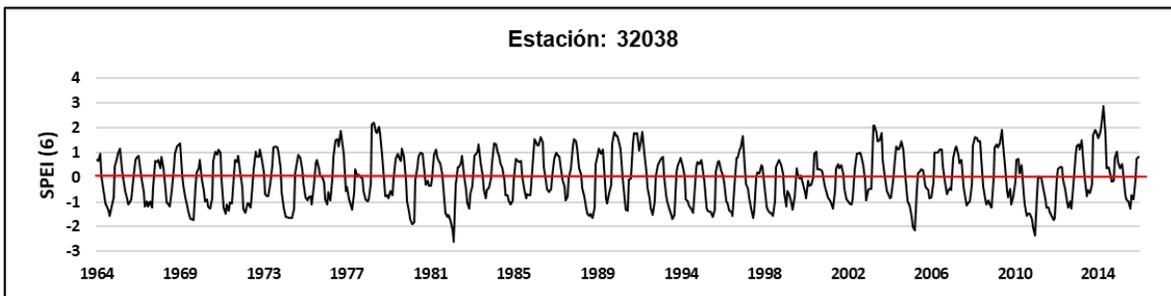
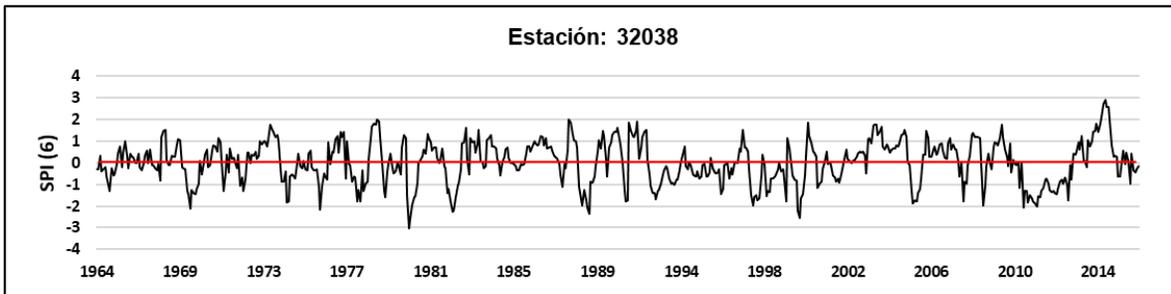
Estación 10076, SPI y SPEI con escala temporal 6 meses.



Estación 10090, SPI y SPEI con escala temporal 6 meses.



Estación 10093, SPI y SPEI con escala temporal 6 meses.



Estación 32038, SPI y SPEI con escala temporal 6 meses.



Anexo 10. Probabilidad de ocurrencia de sequía en la cuenca del río Nazas.

