

Caracterización Espacio Temporal de las Sequías Meteorológicas en la Provincia de García

Rovira

Cristian Camilo Alvarez Camacho, Hernán Darío Jaimes Calderón

Trabajo de Grado para Optar el Título de Ingeniero Forestal

Director

Rubén Carvajal Caballero

MSc en Ciencias Agrarias

Codirector

Rony Alexander Ortiz Aponte

Ingeniero Civil

Universidad Industrial de Santander

Instituto de Proyección Regional y Educación a Distancia IPRED

Programa Ingeniería Forestal

Málaga

2019

Dedicatoria

Este trabajo de grado está dedicado a la Universidad Industrial de Santander UIS sede Málaga como aporte a su crecimiento educativo y científico. Pero en especial está dedicado a toda la comunidad García Rovirense que de alguna u otra forma pueda verse beneficiada en su vida cotidiana con los aportes hechos en esta tesis. Pues fueron la motivación central para llevar a cabo este trabajo.

Una dedicatoria especial a Timoleon Calderón Vargas por su intelecto ecologista, contribuyendo a desviar la mirada hacia la Ingeniería Forestal como proceso formativo.

Agradecimientos

Agradecemos a Dios por permitirnos consolidar este logro tan importante en la ruta o proyecto que hemos trazado para nuestra vida.

Un agradecimiento enorme a nuestra familia, compañera sentimental, hijo, profesores, amigos y conocidos por sus diferentes roles en este proceso y en especial en el crecimiento y madurez personal.

Un agradecimiento y reconocimiento especial al director y codirector de esta tesis quienes aportaron su conocimiento, experiencia y lo más valioso su tiempo. Demostrando que los grandes logros no ocurren por azar, al contrario, ocurren cuando se dedica tiempo y disciplina.

Agradecemos al Instituto de Hidrología, Meteorología y Estudios Ambientales (IDEAM) por la facilidad de los datos correspondientes a las variables climáticas que se cuantifican en la región por medio de la red de estaciones de la provincia.

Tabla de Contenido

Introducción.....	17
1.Objetivos.....	20
1.1.Objetivo General	20
1.2.Objetivos Específicos	20
2.Marco Referencial.....	21
2.1. Marco Teórico.....	21
2.1.1. Definición de sequía.	21
2.1.2. Tipos de sequía.....	23
2.1.2.1. Meteorológicas o climatológicas.....	23
2.1.2.2. Agrícola o edáfica.....	23
2.1.2.3. Hidrológica.....	24
2.1.2.4. Socioeconómica.....	24
2.1.3. Impactos de la sequía.....	24
2.1.3.1. Sociales.	24
2.1.3.2. Ambientales.....	25
2.1.3.3. Económicos.	25
2.1.4. Causas de la sequía.	26
2.1.4.1. De origen natural.	26
2.1.4.1.1. Circulación atmosférica.	27
2.1.4.1.2. Fenómeno de El Niño oscilación del Sur ENSO.....	28

2.1.4.1.3. Variación en la actividad solar.	31
2.1.4.2. De origen antropogénico.	31
2.1.4.2.1. Calentamiento del planeta.	32
2.1.4.2.2. Deforestación y cambios en el uso del suelo.	33
2.1.5. Métodos de caracterización de la sequía.	34
2.1.5.1. Índice estandarizado de precipitación (SPI). Este es el índice general para la caracterización de sequías meteorológicas.	34
2.1.5.1.1. Descripción.	34
2.1.5.1.2. Ventajas. Se listan a continuación:	35
2.1.5.1.3. Desventajas. Se enumeran a continuación:	36
2.1.5.1.4. Escalas temporales de análisis. Se detallan en seguida:	36
2.1.6. Parámetros para caracterizar la sequía.	37
2.1.6.1. Inicio.	37
2.1.6.2. Fin.	37
2.1.6.3. Duración.	37
2.1.6.4. Intensidad.	38
2.1.6.5. Frecuencia.	38
2.1.6.6. Magnitud.	38
2.1.6.7. Distribución Espacial.	38
2.1.7. Climatología.	39
2.1.8. Precipitación.	40
2.2. Marco Histórico.	40

2.2.1. La sequía a nivel mundial.	40
2.2.2. La sequía en la antigüedad.	40
2.2.3. La sequía en Colombia.	42
2.3. Marco Legal	44
3. Metodología	45
3.1. Delimitación del área de estudio	45
3.2. Adquisición de datos.	47
3.3. Pre procesamiento de los datos	49
3.3.1. Ordenar los datos obtenidos.	49
3.3.2. Periodo de tiempo de datos.	50
3.3.3. Completitud de los datos.....	50
3.3.4. Distribución espacial.	51
3.3.5. Consistencia de los datos.	53
3.3.6. Estimación de datos faltantes.	54
3.3.7. Homogeneidad de los datos.	55
3.4. Comportamiento normal de la precipitación	56
3.5. Cálculo y caracterización de las sequías.....	58
3.6. Influencia del fenómeno de El Niño sobre el SPI.	61
3.7. Automatización de la Metodología	62
4. Resultados.....	63
4.1. Bases de datos completas y consistentes	63
4.2. Climatología de la precipitación	64

4.3. Cálculo y caracterización de las sequías meteorológicas	64
4.4. Caracterización y correlación del fenómeno de El Niño oscilación del sur ENSO con las sequías meteorológicas.....	66
4.5. Homogeneidad de los datos	66
4.6. Automatización de la metodología sobre sequías meteorológicas.....	66
5. Análisis de Resultados.....	67
5.1. Bases de datos completas y consistentes para la provincia de García Rovira	67
5.2. Variabilidad de la precipitación en la provincia de García Rovira y la presencia de sequías meteorológicas	68
5.3. Automatización de la metodología sobre caracterización de sequías meteorológicas	73
6. Recomendaciones.....	73
7. Trabajos Futuros	74
8. Conclusiones	74
Referencias Bibliográficas.....	76
Apéndices. (Los apéndices están adjuntos en el CD y puede visualizarlos en base de datos de la biblioteca UIS)	

Lista de Tablas

Tabla 1. Normativa Relacionada con las Sequías.	44
Tabla 2. Solicitud de información meteorológica de las estaciones ante el IDEAM.....	48
Tabla 3. Plantilla para ordenar los datos de precipitación.	50
Tabla 4. Clasificación correlación de Pearson.....	53
Tabla 5. Estaciones aptas para el estudio.	56
Tabla 6. Clasificación Índice Normalizado de Precipitación (SPI) de acuerdo a su intensidad.	59
Tabla 7. Clasificación del SPI de acuerdo a su magnitud.	60
Tabla 8. Clasificación ONI.	62

Lista de Figuras

<i>Figura 1.</i> Clasificación de los tipos de sequía	26
<i>Figura 2.</i> Circulación general de la atmósfera	28
<i>Figura 3.</i> Circulación de la corriente ENSO en condiciones normales.....	29
<i>Figura 4.</i> Circulación Corriente ENSO con Presencia del Fenómeno de El Niño	30
<i>Figura 5.</i> Características evento de sequía meteorológica	38
<i>Figura 6.</i> Área de Estudio.....	47
<i>Figura 7.</i> Distribución unidades climáticas.	52

Glosario

Anomalía: Cambio en el valor promedio considerado como normal con respecto a un periodo de tiempo de las variables climáticas.

Cambio Climático: Son los cambios de los comportamientos normales de una variable climática en un periodo de tiempo lo suficientemente largo para percibir este cambio, lo cual repercute en cambios del clima habitual de una región.

Ciclo Hidrológico: Es la dinámica tierra- atmósfera que presenta el agua en sus diferentes estados.

Clima: Existe una gran diversidad de factores que constituyen el clima de una zona, el cual se entiende como el comportamiento regular o normal de los diferentes componentes climáticos.

Correlación: Esta evalúa la similitud o diferencia en el comportamiento entre dos variables cuantificables.

Desertificación: Corresponde a la degradación de los suelos principalmente por la interacción entre el aprovechamiento insostenible y la variabilidad climática, es más frecuente en zonas áridas.

Escases de agua: Se refiere a la falta del recurso hídrico para satisfacer las demandas en determinada zona.

Índice Oceánico de el Niño (ONI): Es un índice que cuantifica los cambios de temperatura en el océano pacífico, es usado en la región Ecuatorial para definir los periodos del fenómeno de El Niño y de la Niña.

Presión atmosférica: Esta se produce debido el peso que ejerce la atmósfera sobre la tierra. Esta altamente relacionada con los cambios en el clima.

Probabilidad: Es la confianza o convencimiento sobre las posibilidades de ocurrencia que tiene cualquier factor medible, este concepto es de tipo estadístico.

Radiación Solar: Corresponde a la energía que llega a la tierra emitida por el sol, la cual viaja en sus diferentes longitudes de onda por el espacio.

Variabilidad climática: Esta obedece a los diferentes cambios de las variables del sistema climático, esta es ocasionada de forma natural o antrópica; en concreto se refiere a los cambios en cuanto a tiempo y espacio que presentan las diferentes variables meteorológicas. La variabilidad climática se presenta en lapsos de tiempo diario, mensual, estacional, interanual e interdecadal.

Zona árida: Es una condición natural y permanente en determinada zona donde se presenta déficit hídrico, es caracterizada por las bajas precipitaciones.

Resumen

Título: Caracterización Espacio Temporal de las Sequías Meteorológicas en la Provincia de García Rovira *

Autores: Hernán Darío Jaimes Calderón, Cristian Camilo Álvarez Camacho **

Palabras Clave: Climatología, Ciclo hidrológico, Estación climática, Pluviómetro, Precipitación, Cambio climático, Correlación, Fenómeno de El Niño, Programación.

Descripción:

A nivel mundial ha incrementado la concentración de gases efecto invernadero en la atmósfera, modificando el clima. Esta problemática en muchas regiones del mundo puede aumentar los niveles de precipitación o generar sequías más extremas. Frente a esta situación se afectan los niveles de productividad de ecosistemas boscosos y agroecosistemas cultivados. Por tanto, el propósito de este trabajo fue realizar una caracterización espacio temporal de las sequías meteorológicas en la provincia de García Rovira. El procedimiento consistió en recolectar la información climática del Instituto de Hidrológica, Meteorología y Estudios Ambientales (IDEAM) de las diferentes estaciones climáticas de la Provincia, luego se procedió a realizar el preprocesamiento y procesamiento de los datos, lo cual se realizó teniendo en cuenta diferentes herramientas estadísticas acordes al comportamiento de los mismos datos, entre las pruebas más relevantes se tiene la prueba de bondad de ajuste, el test de Lilliefors, el test de Mann Kendall, la estandarización de los datos, el test gamma, el Índice Estandarizado de Precipitación SPI, el coeficiente de correlación de Pearson y la aplicación del método estadístico entre otras. La distribución espacial de la precipitación se llevó a cabo en el software ArcGIS 10.3. Las sequías en la provincia están más condicionadas por el fenómeno de El Niño, componentes orogénicos y por los regímenes bimodales de la provincia. Igualmente se pudo establecer una base de datos climáticos con más de 30 años de registros, que han permitido una mayor precisión del moldeamiento de la sequía espaciotemporal a partir del el SPI. Se elaboró una aplicación programada en el software R. Project 3.5, que consistió en automatizar la metodología de la investigación, facilitando la corroboración de datos con el fin de seguir monitoreando el clima y consolidar núcleos productivos agrícolas, pecuarios y forestales.

*Trabajo de grado

** Instituto de Proyección Regional y a Distancia IPRED. Programa de Ingeniería Forestal. Director Rubén Carvajal Caballero, MSc en Ciencias Agrarias. Codirector Rony Alexander Ortiz Aponte, Ingeniero Civil

Abstract

Title: Characterization Temporary Space of the Meteorological Droughts in the Province of Garcia Rovira

Author: Hernán Darío Jaimes Calderón, Cristian Camilo Álvarez Camacho **

Key words: Climatology, Hydrological cycle, Climate station, Rain gauge, Precipitation, Climate change, Correlation, El Niño phenomenon, Programming.

Description:

Globally, the concentration of greenhouse gases in the atmosphere has increased, changing the climate. This problem in many regions of the world can increase precipitation levels or generate more extreme droughts. Faced with this situation, the productivity levels of forested ecosystems and cultivated agroecosystems are affected. Therefore, the purpose of this work was to perform a temporal space characterization of meteorological droughts in the province of García Rovira. The procedure consisted of collecting the climatic information of the Institute of Hydrology, Meteorology and Environmental Studies (IDEAM) of the different climatic stations of the Province, then proceeded to perform the preprocessing and processing of the data, which was carried out taking into account different statistical tools according to the behavior of the same data, among the most relevant tests is the goodness of fit test, the Lilliefors test, the Mann Kendall test, the standardization of the data, the gamma test, the Standardized Precipitation Index SPI, Pearson's correlation coefficient and the application of the statistical method among others. The spatial distribution of precipitation was carried out in the ArcGIS 10.3 software. Droughts in the province are more conditioned by the El Niño phenomenon, orogenic components and by the bimodal regimes of the province. Likewise, it was possible to establish a climate database with more than 30 years of records, which have allowed a greater precision of the molding of the space-time drought from the SPI. An application programmed in the R. Project 3.5 software was developed, which consisted of automating the research methodology, facilitating the corroboration of data in order to continue monitoring the climate and consolidating agricultural, livestock and forestry production centers.

*Bachelor Thesis

** Instituto de Proyección Regional y a Distancia IPRED. Programa de Ingeniería Forestal. Director Rubén Carvajal Caballero, MSc en Ciencias Agrarias. Codirector Rony Alexander Ortiz Aponte, Ingeniero Civil.

Introducción

La historia manifiesta que el clima ha afectado a las diferentes civilizaciones en el mundo, esto se ha evidenciado por medio de los efectos derivados de las sequías en sus diferentes actividades, en especial la agricultura (Lettenmaier, 2003). Además, las sequías han sido catalogadas como uno de los fenómenos naturales más costosos y menos entendidos debido a su dificultad a la hora de realizar su caracterización (Rivera, 2014). La Oficina de las Naciones Unidas para la Reducción del Riesgo de Desastres afirmó que durante el lapso de tiempo entre 1992-2012 la ocurrencia del evento afectó a más de mil millones de personas a nivel global, con pérdidas totales por un valor de 71.000 millones de dólares (Rivera, 2014). Cabe destacar que, durante la década de 1980, la ocurrencia de éste cobró la vida de más de medio millón de personas solamente en África (Rivera, 2014).

A nivel de Colombia la presencia de sequías está estrechamente ligada con el fenómeno de El Niño dado que los años de mayor incidencia de sequías coinciden con la manifestación de este fenómeno. Además, hay que tener en cuenta que prácticamente todos los años presentan algún tipo de sequía en algún lugar del territorio nacional. En la región Pacífica y el Suroccidente de la región Andina se observa una tendencia a la disminución de lluvias y por tanto al aumento de la ocurrencia de eventos de sequía meteorológica (IDEAM, 2012).

La Provincia de García Rovira presenta una gran variedad de zonas climáticas y coberturas vegetales, lo cual hace que la región sea altamente susceptible a este fenómeno. Por lo tanto, surge el interés de determinar ¿cuál ha sido la evolución de las sequías meteorológicas en la región?

En base a la problemática anterior y a que en la actualidad la humanidad se enfrenta a diferentes retos entre ellos los causados por el cambio climático, debido al aumento de gases efecto invernadero (GEI) en la atmósfera, generando alteraciones en la distribución y variabilidad de la precipitación, lo cual influye notablemente en la presencia del fenómeno de las sequías (Solomon *et al.*, 2007). Otros factores que pueden incidir son la presencia del fenómeno de El Niño, la variación en la actividad solar junto con la deforestación y el cambio de cobertura del suelo (Crespo, 2004).

La importancia de caracterizar las sequías está en tener información con el fin de planificar acciones pertinentes con antelación y no a medida que ocurre el fenómeno (Barros *et al.*, 2005), lo cual, disminuye los costos económicos sociales y ambientales que pueden ocasionar las mismas (Ortega, 2012).

La investigación busca proporcionar información que será útil para toda la comunidad, debido a que gran parte de su territorio tiene una cobertura vegetal donde predominan los pastos para ganadería extensiva y los cultivos con el 51% del área total, herbazal, arbustal y bosque de transición ocupan un 40,8% y un 5,8% los bosques naturales según el IDEAM. Coberturas que son altamente afectadas por el fenómeno de la sequía, siendo el sector agropecuario el primero en ser afectado, debido a que disminuyen los rendimientos (Rivera, 2014). Los ecosistemas y biomas naturales también se ven altamente afectados debido a que aumentan o se disparan las plagas, además el estrés hídrico en las plantas ocasiona un debilitamiento, disminución de la productividad y aumento de la vulnerabilidad a ataques fitosanitarios (Lloret y Siscar, 1995). Sin dejar de lado la presencia de incendios forestales que se ven altamente incitados en las temporadas secas (Muñoz, 1995).

El estudio será de gran importancia para las entidades administrativas y públicas a la hora de establecer sus respectivas planificaciones como lo son: planes de ordenamiento territorial, ordenación de cuencas hidrográficas, ordenación de bosques, entre otros.

La comunidad académica y científica también es beneficiada debido a que en las principales bases de datos de revisión de literatura no se encuentran estudios de estas características para la provincia de García Rovira. Por otra parte, la investigación contribuye a ampliar la base de datos de precipitación que pueden servir de punto de partida para futuras investigaciones en la región concernientes con el tema.

1. Objetivos

1.1. Objetivo General

Realizar una caracterización espacio temporal de las sequías meteorológicas en la provincia de García Rovira, utilizando el índice de precipitación estandarizado SPI.

1.2. Objetivos Específicos

Cuantificar los valores normales de la precipitación (mm) para la provincia de García Rovira.

Calcular y caracterizar las sequías meteorológicas en la provincia de García Rovira, utilizando el índice estandarizado de precipitación SPI.

Determinar la frecuencia de ocurrencia del fenómeno de El Niño y su correlación con las sequías meteorológicas en la región.

Automatizar la metodología referente a la investigación de sequías meteorológicas, mediante el software R Project.

2. Marco Referencial

2.1. Marco Teórico

2.1.1. Definición de sequía. A la hora de definir la sequía muchos autores como Rivera (2014)., Vega (2018)., y Quispe (2012) afirman y concluyen en común, que no existe una definición universal, que el concepto de sequía va de acuerdo al caso específico de estudio; debido a que se trata de un fenómeno natural cuyas características tienen una gran variación geográfica, temporal, económica y social como lo menciona Quispe (2012) “No es lo mismo una sequía extrema en países sub-saharianos que en los Andes tropicales”(Valarezo, 2017) por lo tanto se plasmaran algunas definiciones de fuentes relacionadas con el tema de sequías.

Según la Organización Meteorológica Mundial define la sequía “como un periodo de condiciones meteorológicas a normalmente secas, suficientemente prolongado como para que la falta de precipitación cause un grave desequilibrio hidrológico”(Paredes *et al.*, 2008 y Quispe, 2012).

En el documento de la convención de lucha en contra de la desertificación, la Organización de las Naciones Unidas define la sequía como el fenómeno que se produce naturalmente cuando las lluvias han sido considerablemente inferiores a los niveles normales registrados, causando un agudo desequilibrio que perjudica los sistemas de producción de recursos de tierras (Salinas, 2017).

Se reunieron conceptos de diferentes autores con el fin de construir una definición acorde con los objetivos de esta investigación; para lo cual, se determina que hay dos tipos de definiciones de la sequía: conceptual y operacional (Valiente, 2001; Zuluaga *et al.*, 2009; Paredes, 2012).

Quedando la primera definición como una manifestación natural dramática de la variabilidad del ciclo hidrológico y uno de los fenómenos climáticos más complejos, que se presenta como un periodo prolongado con déficit de precipitación con respecto a los valores más representativos para un área específica denominados como promedios o valores normales (Rivera, 2014; Valarezo, 2017; Vega y Rodríguez, 2018); cuando estas se prolongan se evidencian en la incapacidad de satisfacer agua para las demandas de las actividades humanas y del medio ambiente (Vega y Rodríguez, 2018; Paredes *et al.*, 2018); sus efectos pueden sobrevenir en poco tiempo o tardar meses en presentarse, además estos impactos pueden mantenerse más allá de la finalización de un periodo de sequía según Paredes *et al.*, (2018) es un desastre lento que no presenta trayectorias definidas y tiende a extenderse de manera irregular a través del tiempo y del espacio, lo que hace que cada periodo de sequía sea único (Poquet *et al.*, 2008; Campos, 2016). A nivel mundial se constituyen como una de las amenazas más graves y difíciles de anticipar, cuantificar y controlar tanto en escalas nacionales como regionales percibiéndose como uno de los desastres naturales más costosos y complejos para entender, dada la dificultad para caracterizar el fenómeno (Rivera, 2014; Campos, 2016). Cabe destacar que las sequías “ocurren en todas las zonas climáticas y en cualquier época del año”(Rivera, 2014), los episodios secos afectan en mayor proporción a las latitudes medias y las zonas tropicales, además en las próximas décadas se espera que las sequías sean más frecuentes y severas debido al cambio climático (Rivera, 2014; Arriaga *et al.*, 2017; Paredes *et al.*, 2018). La definición de tipo operacional en las cuales se precisan características como el momento de inicio, fin, frecuencia, intensidad media, intensidad máxima, magnitud y distribución espacial de los eventos de sequía entre otras características (Valiente, 2001; Pichardo, 2006; Loaiza, 2018).

2.1.2. Tipos de sequía. Whilhite y Glantz en 1985 registraron más de 150 definiciones sobre los tipos de sequía y las clasificaron en cuatro categorías: meteorológicas, agrícolas, hidrológicas y socioeconómicas (ver Fig. 1), según la disciplina científica desde la cual se analiza el fenómeno (Valiente, 2001; Zuluaga *et al.*, 2009; Rivera, 2014; Valarezo, 2017; Vega, 2018).

2.1.2.1. Meteorológicas o climatológicas. Es una condición anormal, natural y recurrente del clima resultante de varios factores (Zuluaga *et al.*, 2009), lo cual corresponde a un periodo de tiempo con precipitación por debajo de los niveles normales para una región en particular (Rivera, 2014; Salinas, 2017; Vega y Rodríguez, 2018). Este tipo de sequía se considera como el más importante debido a que precede y causa los demás tipos de sequías (Rivera, 2014) (Valarezo, 2017), los cuales dependen en gran parte del déficit de precipitación que se verá reflejada en las diferentes fases del ciclo hidrológico (Vega, 2018). Este tipo de sequías debe analizarse con atención debido a que los valores esperados de la precipitación son muy versátiles de una región a otra, debido a que las condiciones atmosféricas son muy variables lo que ocasiona que el indicador estadístico no sea estacional (que varía a través del tiempo) (Zuluaga *et al.*, 2009; Torres y Granados, 2018).

2.1.2.2. Agrícola o edáfica. Se presenta cuando no hay la humedad apta en el suelo para satisfacer el desarrollo en cualquiera de sus fases de crecimiento de cualquier especie vegetal o animal, en especial los cultivos por ser lo de mayor interés para las diferentes comunidades (Valiente, 2001; Ortega, 2012; Quispe, 2012).

2.1.2.3. Hidrológica. Se presenta cuando hay deficiencia de aguas superficiales o Subterráneas para satisfacer los usos establecidos en un sistema de gestión del recurso hídrico (Valiente, 2001; Ortega, 2012; Salinas, 2017; Vega y Rodríguez, 2018).

2.1.2.4. Socioeconómica. Se presenta cuando hay una deficiencia del recurso hídrico para cualquier actividad del ser humano en especial las vitales (económicas o personales) (Valiente, 2001; Rivera, 2014).

2.1.3. Impactos de la sequía. Al fenómeno de las sequías se le conoce más por sus impactos que por sus características mismas, sus impactos están relacionados con la posibilidad de cualquier tipo de vida en especial (Ortega, 2012). Aunque los mismos tienen un desarrollo lento y no tan dramático como otros fenómenos naturales por ejemplo las avalanchas o los tornados, los efectos de la sequía suelen ser de mayor holgura y más devastadores (Crespo, 2004; Ortega, 2012). Cabe mencionar que las sequías son el segundo fenómeno que más afecta a la población mundial siendo superadas por las inundaciones (Rivera, 2014).

Según el Centro Nacional de Mitigación de Sequías de los Estados Unidos (NMDC por sus siglas en inglés) clasifican los impactos de la sequía en tres grandes grupos: sociales, Ambientales y económicos (Ortega, 2012) (ver Fig. 1).

2.1.3.1. Sociales. Estos impactos no solo dependen de la falta de precipitación si no que influye el nivel de calidad de vida de las comunidades y de su capacidad de ejercer resiliencia con respecto al fenómeno (Loaiza, 2018); entre los más importantes esta la escases en cantidad y calidad de los alimentos, desnutrición, aumento de diferentes enfermedades, aumento de la

morbilidad, aumento de la pobreza, conflictos sociales y políticos por el uso del agua, falta de empleo, migración abandono de tierras fértiles entre otros(; Crespo, 2004; Ortega, 2012; Salinas, 2017).

2.1.3.2. Ambientales. Como ya se mencionó la sequía afecta a todo tipo de ciclo natural presente en la tierra, en la parte ambiental los efectos más representativos son daños frecuentemente irreversibles en la flora y fauna en especial las especies endémicas, se aceleran los procesos de erosión hídrica y eólica, se afecta el ciclo hidrológico como la cantidad y la calidad del agua, aumenta la contaminación del aire, deterioro de la calidad visual del paisaje, procesos de desertificación, y en especial un incremento de vulnerabilidad de los ecosistemas debido a que aumentan y se disparan las plagas (Crespo, 2004; Ortega, 2012; Salinas, 2017). En cuanto a la parte forestal se ve altamente afectada debido al debilitamiento de las especies florísticas causando bajos rendimientos, haciéndose más vulnerables a los ataques de patógenos y plagas, la suma de estos con otros factores puede causar la mortalidad de rodales de grandes extensiones (Lloret y Siscar, 1995). Pero sin duda los mayores impactos los causan los incendios forestales que son altamente estimulados con la presencia de sequías (Muñoz, 1995; Loaiza, 2018).

2.1.3.3. Económicos. En cuanto a los efectos económicos sin duda los sectores agropecuario y forestal son los primeros en ser afectados, causando bajos rendimientos y pérdidas de productos, lo cual repercute en las actividades industriales debido al alza de los precios de las materias primas en el mercado. También tiene influencia en el incremento de costos de energía en especial la hidroeléctrica y el suministro del recurso hídrico. En general se puede concluir que afecta todo

tipo de actividad económica que se realice (Crespo, 2004; Ortega, 2012; Salinas, 2017; Loaiza, 2018).

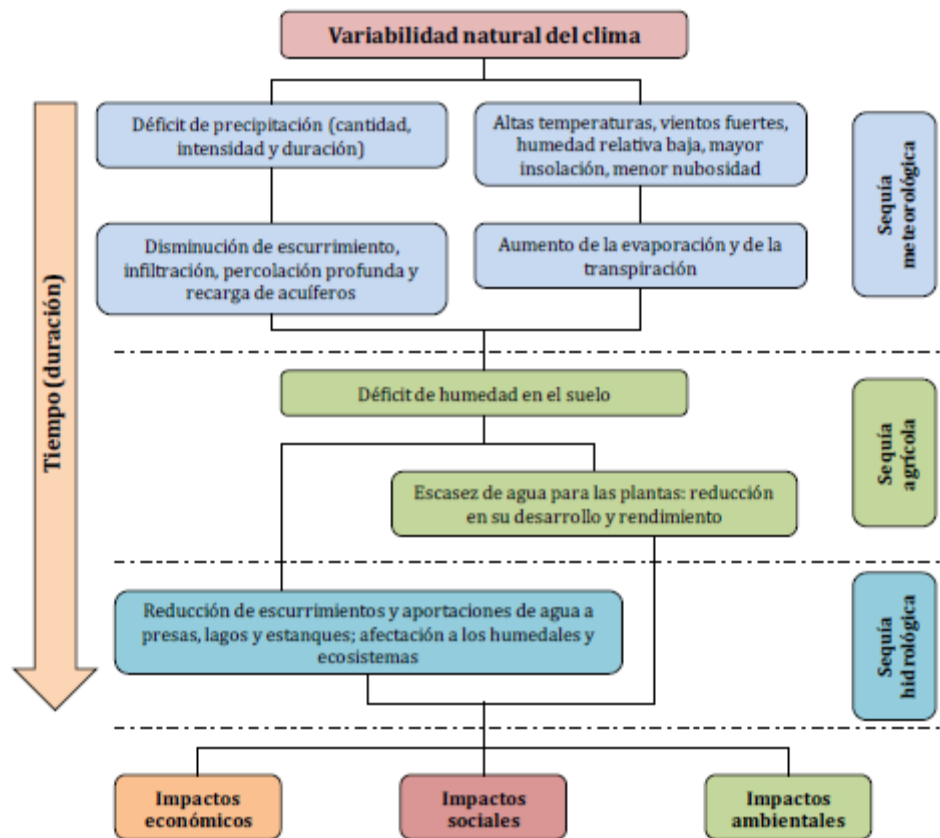


Figura 1. Clasificación de los tipos de sequía. Adaptado de Ortega (2012). Sequía en Nuevo León: vulnerabilidad, impactos y estrategias de mitigación. Recuperado de https://books.google.com/books?hl=es&lr=&id=WpAANbM6I_kC&oi=fnd&pg=PA195&dq=ortega+2012&ots=CozYF1wXCk&sig=aIiup2rKbb-lx0vmyYHI7ctU7eQ

2.1.4. Causas de la sequía. Las principales causas de las sequías se agrupan en dos categorías: las de origen natural y las de origen antropogénico (Ortega, 2012).

2.1.4.1. De origen natural. Son determinadas las causas más importantes para que se produzca una sequía, a las cuales nos debemos adaptar, entre las más relevantes tenemos:

2.1.4.1.1. *Circulación atmosférica.* Se refiere al movimiento del aire a gran escala producto del calentamiento desigual de la tierra, debido a la distribución y relación de continentes, mares, orografía del terreno, la radiación solar entre otros factores (Ortega, 2012), lo cual ocasiona modificaciones en la atmósfera, lo que ocasiona la variabilidad en la temperatura del aire, humedad del aire, del suelo, evapotranspiración, vientos y en especial la precipitación que son los principales factores que influyen en la presencia de sequías (Quispe, 2012; Vega, 2018). Estos movimientos de aire actúan de la siguiente forma, el aire sobre la región ecuatorial (30_ N a 30_ S) es más cálido que en el resto de la superficie terrestre, lo cual ocasiona su ascenso hacia los polos, en el transcurso disminuye su temperatura ocasionando el descenso a los 30_ N y 30_ S, al calentarse se dividen los vientos, unos van al Ecuador y los otros se dirigen a los polos, los vientos que se dirigen a los polos concurren a unos 60_ N y 60_ S y son forzados a ascender por los vientos fríos de la superficie del este y se dirigen a los polos (Paredes, 2012) (ver Fig. 2). En la línea del Ecuador se dividen los vientos unos van hacia el polo norte y los otros hacia el polo sur, esa división es lo que se conoce como la Zona de Convergencia Intertropical (ZCIT), esta franja formada no es estática y su movimiento esta entre los 20_ N y los 20_ S, esta tiende a seguir el movimiento del sol, además ocasiona variabilidad climática a su paso en las diferentes regiones (Paredes, 2012), en Colombia la ZCIT está relacionada con la mono modalidad y bimodalidad de la distribución de la precipitación en el ciclo anual; esta pasa dos veces por el territorio Colombiano, en octubre y noviembre cuando se dirige hacia el sur y en abril y mayo hacia el norte lo cual ocasiona dos épocas de aumento de la precipitación (Mejía *et al.*, 1999).

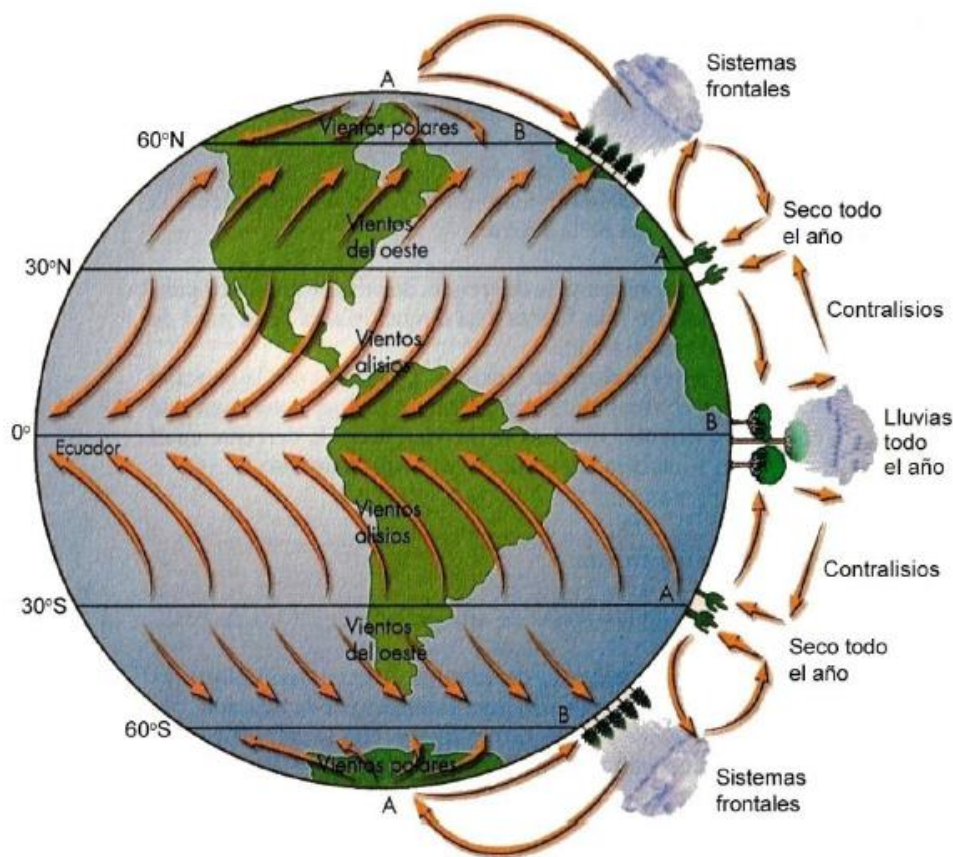


Figura 2. Circulación general de la atmósfera. Adaptado de Ortega (2012). Sequía en Nuevo León: vulnerabilidad, impactos y estrategias de mitigación. Recuperado de https://books.google.com/books?hl=es&lr=&id=WpAANbM6I_kC&oi=fnd&pg=PA195&dq=ortega+2012&ots=CozYF1wXCk&sig=aliup2rKbb-lx0vmyYHI7ctU7eQ

2.1.4.1.2. *Fenómeno de El Niño oscilación del Sur ENSO*. El océano y la atmósfera entre otros factores del sistema climático intercambian materia y energía de manera constante (mediante procesos de evaporación, precipitación entre otros), en magnitudes proporcionalmente mayores en comparación con otros componentes del sistema climático; el océano y la atmósfera son los responsables en mayor proporción de la variabilidad climática en el planeta (Bocanegra y Pabón, 2000).

La componente atmosférica oscilación del sur ENSO corresponde a la variación inter anual de la presión atmosférica entre el centro de altas presiones del Pacífico (isla de Pascua) y el centro de bajas presiones en (Indonesia y Australia), además es un movimiento de Oriente a Occidente

de masas de aire entre el Pacífico y la región Australiana, la cual está altamente relacionada y modificada por el fenómeno de El Niño y La Niña, por lo tanto este fenómeno recibe el nombre de El Niño oscilación del sur ENSO, el cual equivale a un ciclo océano-atmosférico con una frecuencia de 3 a 8 años (Ortega, 2012). Este fenómeno hace referencia a los cambios de temperatura de las aguas superficiales en el océano pacifico Ecuatorial, central y oriental en particular las costas del oeste de Suramérica en países como Perú, Ecuador y el sur de Colombia (León *et al.*, 2017; Montealegre, 2014); este fenómeno cambia la dinámica de los vientos en el océano pacifico, teniendo la capacidad de cambiar la circulación atmosférica global siendo el responsable de variaciones climáticas en especial de la precipitación del planeta (Vega y Rodríguez, 2018) y no como se pensaba anteriormente que el fenómeno solo afectaba a la costa oeste de América del sur (Ortega, 2012).

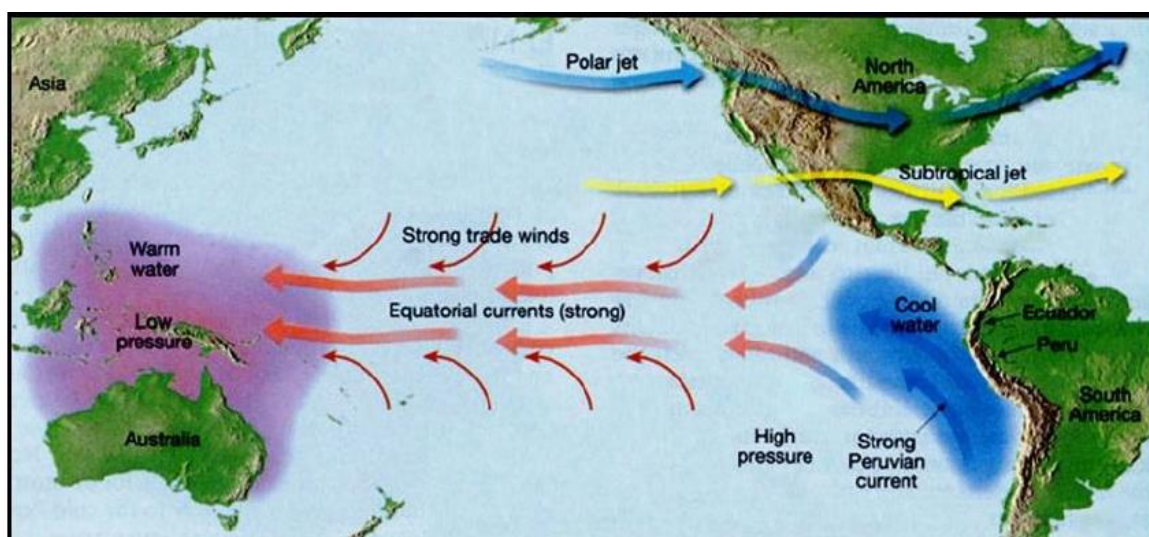


Figura 3. Circulación de la corriente ENSO en condiciones normales. Adaptado de Ortega (2012). Sequía en Nuevo León: vulnerabilidad, impactos y estrategias de mitigación. Recuperado de https://books.google.com/books?hl=es&lr=&id=WpAANbM6I_kC&oi=fnd&pg=PA195&dq=ortega+2012&ots=CoZYF1wXCk&sig=aIiup2rKbb-lx0vmyYHI7ctU7eQ

La dinámica océano atmosférico en el pacifico en condiciones normales es: el agua superficial y las masas de aire caliente son direccionados al oeste en gran medida por los vientos alisos,

como complemento el agua fría de la parte este del océano asciende (Vega y Rodríguez, 2018) (ver Fig.3). Ahora en condiciones anormales o con presencia del fenómeno El Niño el cual manifiesta características como, aguas superficiales más cálidas, la dinámica es la siguiente: la diferencia de presión este oeste disminuye lo cual causa un debilitamiento de los vientos alisos y un desplazamiento del núcleo de convección profunda del oeste al centro del océano pacifico tropical (ver Fig.4). E el fenómeno de La Niña donde ocurre todo lo contrario (Montealegre, 2014; Trujillo, 2018).

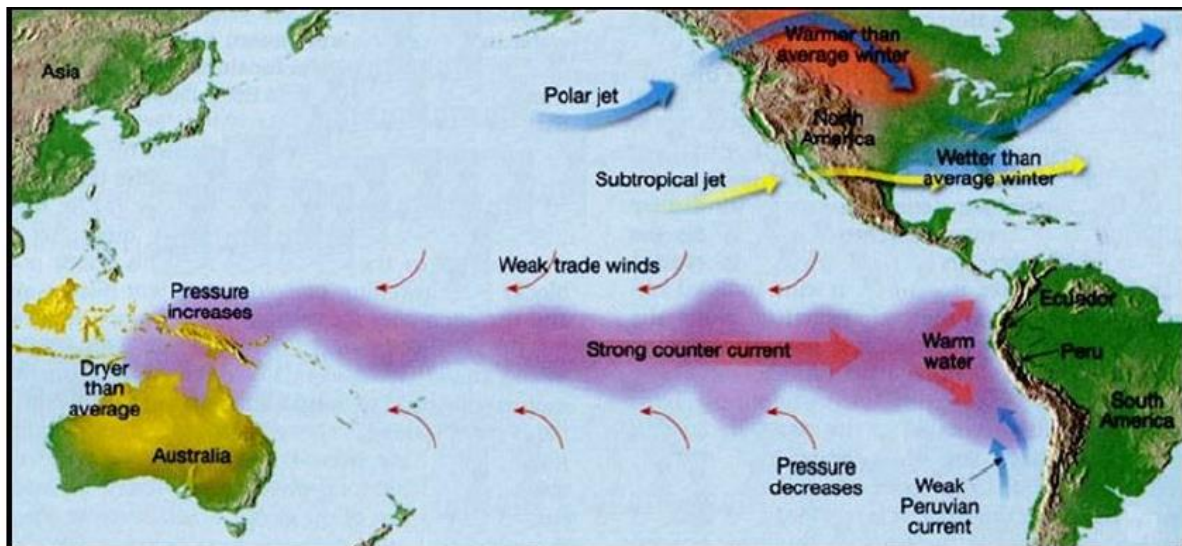


Figura 4. Circulación Corriente ENSO con Presencia del Fenómeno de El Niño. Adaptado de Ortega (2012). Sequía en Nuevo León: vulnerabilidad, impactos y estrategias de mitigación. Recuperado de https://books.google.com/books?hl=es&lr=&id=WpAANbM6I_kC&oi=fnd&pg=PA195&dq=ortega+2012&ots=CozYF1wXCk&sig=aIiup2rKbb-lx0vmyYHI7ctU7eQ

El fenómeno de El Niño fue percibido en primera instancia por pescadores del oeste de Perú hace cientos de años en el mes de diciembre, época en la cual se tiene la cultura de celebrar el nacimiento de Jesús, de ahí el nombre de fenómeno de El Niño; desde entonces, pero en especial

desde la mitad del siglo XX ha cautivado y motivado a entender mejor su comportamiento por parte de la comunidad científica (Ortega, 2012).

Existe una gran variedad de índices para realizar su monitoreo y caracterización, pero para fines de esta investigación se tendrá en cuenta el Oceanic Niño Index (ONI) desarrollado por el Climate Prediction Center (CPC) de la NOAA (Rivera, 2014).

2.1.4.1.3. Variación en la actividad solar. El sol es la principal fuente de energía que tiene la tierra, además se ha demostrado la relación que existe entre la actividad magnética media del sol con la variación del clima terrestre y con ello en la ocurrencia de sequías. El ciclo del sol con respecto a la presencia de manchas solares sucede aproximadamente cada 11 años según mediciones realizadas el siglo pasado, esto hace variar la cantidad de radiación solar que llega a la tierra y por ende cambia el comportamientos de las variables climáticas de la tierra, en especial la temperatura y la presión atmosférica, lo cual genera alteraciones en la circulación atmosférica , se tienen menores precipitaciones durante un mínimo de manchas solares (Agosta, 2004; Ortega, 2012). En una investigación realizada en la península de Yucatán, México demostraron la relación que existe entre la periodicidad de 206 años que tiene la variación de la actividad solar, con el patrón recurrente de la sequía el cual tiene un periodo de 208 años (Hodell *et al.*, 2001).

2.1.4.2. De origen antropogénico. Las actividades humanas y la falta de planificación coherente del uso de recursos naturales de forma sostenible ya sea por la falta de conocimiento o conciencia por parte de los seres humanos o por los intereses del sistema capital que ha regido al mundo, lo cual influye en la presencia de sequías y de otros factores hidrometeorológicos; es

probable que esta influencia es aun de pequeña escala, pero de forma creciente (Ortega, 2012). Las principales causas se describen a continuación.

2.1.4.2.1. Calentamiento del planeta. El planeta presenta una variabilidad climática natural en sus diferentes variables meteorológicas, influenciadas principalmente por la actividad solar y volcánica, esto se constataba hasta la década de los 70 del siglo pasado por gran parte de los climatólogos quienes afirmaban que las fluctuaciones presentadas eran estables y naturales. El calentamiento inicial continuo, batiéndose los récords de los años más cálidos, esto lo describe el Panel Intergubernamental sobre Cambio Climático (IPCC) en su cuarto informe donde afirma que existe un aumento global de la temperatura de $0,74\text{ }^{\circ}\text{C}$ en el periodo de 1906 a 2005. A nivel global, esto se evidencio mediante datos cuantificados que datan a partir el siglo XIX; años cada vez más cálidos siguieron presentándose, los cuales fue difícil argumentar mediante la variabilidad natural, comenzó entonces a surgir la hipótesis a que dicho calentamiento cada vez más acelerado se le atribuye también aunque en menor proporción a las actividades antrópicas, siendo la comunidad científica la que ha ratifico este hecho denominándolo variabilidad antrópica, que se debe en especial al aumento de los GEI en la atmósfera, como lo son el bióxido de carbono (CO_2), metano (CH_4), óxido nitroso (NO_2) y el ozono (O_3) principalmente; la producción de estos gases se debe en mayor proporción a las actividades humanas como la quema de combustibles fósiles (petróleo, gas natural y carbón), la deforestación y los desechos producidos de las actividades agropecuarias, los cuales han afectado el flujo natural de la atmósfera. El dióxido de carbono se ha establecido como el GEI principal que está causando dichos cambios en la atmósfera, esta afirmación ha sido constatada debido a que se ha pasado de 315 ppm en 1958 a 384 ppm en 2008, además este incremento aumentará de forma exponencial.

Existen otras evidencias del calentamiento de la tierra como lo es la información brindada por los satélites, observaciones, fenómenos oceanográficos, biológicos, glaciológicos, sedimentológicos etc., lo cual ha ratificado el convencimiento de que si existe un cambio climático inducido por el ser humano incluso por los más reacios y escépticos (Vide, 2008; Escobar, 2011; Ortega, 2012).

2.1.4.2.2. Deforestación y cambios en el uso del suelo. En los últimos 8000 años se ha perdido más de la mitad de la cubierta forestal siendo Europa y África los continentes más deforestados, en la década de 1990 Brasil fue el país más deforestado, con una pérdida de bosque de 22.264 km², Colombia no es ajena al hecho debido a que no se tiene una conciencia pública sobre el comercio de madera ilegal y el avance de la frontera agropecuaria, por lo tanto, se están deforestando cerca de 8 km² anualmente. El cambio del uso potencial del suelo genera desertificación, vulnerabilidad a la escases de agua ya que los suelos pierden la capacidad de capturar y retener la humedad, lo cual resulta en un cambio del patrón climático regional; por lo tanto se evidencia la retroalimentación del fenómeno de las sequías, debido a que la cobertura libre de vegetación devuelve una mayor cantidad de calor a la atmósfera y genera ciertas nubes continentales (cumulus) sobre las marítimas, lo que ocasiona un déficit de precipitación(Escobar, 2011; Ortega, 2012).

Estas afirmaciones con respecto a la variabilidad del clima son las de mayor probabilidad presentan y las estudiadas hasta el momento, teniendo en cuenta que la variabilidad climática terrestre no está totalmente definida, debido a la diversidad de factores que influyen en el mismo cuya relevancia no ha sido determinada (Agosta, 2004).

2.1.5. Métodos de caracterización de la sequía. Para cuantificar y caracterizar la sequía, en la literatura se encuentran diferentes indicadores como lo son la precipitación, temperatura, evapotranspiración, caudales fluviales, los niveles de aguas subterráneas, los embalses, la humedad del suelo, el manto de la nieve entre otros. La mayoría de los autores afirman que el indicador principal es la precipitación; con base en estos indicadores se ha avanzado en la constitución de diferentes índices de sequía. En la actualidad gracias a los Sistemas de Información Geográfica (SIG) y el avance de los recursos informáticos, se pueden encontrar una gran variedad de índices de sequías. A la hora de caracterizar el fenómeno se determinará el índice más adecuado lo cual depende de la información con que se cuente y los objetivos planteados (OMM, 2012; OMM, 2016).

2.1.5.1. Índice estandarizado de precipitación (SPI). Este es el índice general para la caracterización de sequías meteorológicas.

2.1.5.1.1. Descripción. Este índice surgió en la universidad del estado de Colorado (Estados Unidos), como producto de una investigación llevada a cabo por Mckee, Doesken y Kleist en 1992. El fundamento de este índice es la relación que existe entre la sequía, la frecuencia, la duración y las escalas temporales de análisis. Este índice se dio a conocer en la octava conferencia sobre climatología aplicada llevada a cabo en el año 1993. El cálculo del SPI se basa únicamente en los registros de precipitación para un periodo determinado, los datos de precipitación a largo plazo se ajustan a una distribución de probabilidades y dicho resultado luego se transforma en una distribución normal, de tal manera que el valor de precipitación promedio para dicha localidad es cero y los valores negativos corresponde a periodos de sequía y

los valores positivos a periodos húmedos, por lo tanto el índice tiene efectos múltiples y a diferentes escalas abordando diversos tipos de sequía, este índice se podrá utilizar a cualquier escala de tiempo siempre y cuando satisfaga los niveles de confianza estadística en las estimaciones de probabilidad (OMM, 2012; OMM, 2016); hay que recalcar que el SPI no es útil para los análisis de cambio climático ya que no aborda la temperatura como parámetro de cálculo (OMM, 2012).

2.1.5.1.2. Ventajas. Se listan a continuación:

- Fácil de usar debido a que solo necesita datos de precipitación para su cálculo (OMM, 2012; OMM, 2016).
- Coherente espacialmente debido a que es un índice estandarizado, por lo cual puede ser aplicado a todos los regímenes climáticos y comparado entre distintas regiones para su análisis (OMM, 2012; OMM, 2016).
- Puede ser calculado con ausencia de datos, lo cual es valioso para aquellas regiones que no presentan bases de datos de precipitación completas (OMM, 2012; OMM, 2016).
- Flexible debido a que se puede calcular para diversas escalas de tiempo, lo que hace que el índice tenga una gran variedad de aplicaciones (OMM, 2012; OMM, 2016).
- Su fundamento probabilístico le concede un contexto histórico importante a la hora de realizar su análisis (OMM, 2012; OMM, 2016).
- Existen grandes recursos como son un programa efectuado por la OMM y una librería en el software R Project para facilitar su cálculo y posterior caracterización de las sequías y las humedades (OMM, 2012; OMM, 2016).
- Existe una amplia gamma de estudios científicos publicados sobre el SPI.

2.1.5.1.3. Desventajas. Se enumeran a continuación:

- Su cálculo se basa únicamente en la precipitación (OMM, 2012; OMM, 2016).
- No contiene algún parámetro de equilibrio entre el agua y el suelo como temperatura, evapotranspiración entre otros, (OMM, 2012; OMM, 2016).
- La flexibilidad y fácil uso que presenta el índice se puede prestar para un uso erróneo del mismo (OMM, 2016).
- Existen diversas versiones del SPI ensaladas en diversos softwares informáticos los cuales pueden tener algoritmos que no son coherentes con el SPI original (OMM, 2016).
- Existen diferentes índices más compuestos los cuales tienen en cuenta otras variables meteorológicas como la temperatura (OMM, 2012; OMM, 2016).

2.1.5.1.4. Escalas temporales de análisis. Se detallan en seguida:

- SPI de 1 mes: refleja las condiciones de déficit hídrico a corto plazo en el suelo y por consiguiente en los cultivos sobre todo en sus fases iniciales, su aplicación está altamente relacionada con las sequías meteorológicas. La interpretación puede tener errores si no se cuantifica de forma adecuada la climatología de la región, sin embargo, su análisis debe realizarse de forma rigurosa (OMM, 2012).
- SPI de 3 meses: se puede utilizar para llevar a cabo el análisis estacional de la precipitación, en esta escala se ponen de manifiesto las condiciones de humedad del suelo a corto y mediano plazo, en las regiones agrícolas es más eficaz que el índice de severidad de sequía de palmer; es importante compararlo con escalas más largas (OMM, 2012).

- SPI de 6 meses: en esta escala se muestra la precipitación en diferentes estaciones, además en función de la región y época del año se pueden evidenciar los caudales de las aguas superficiales (OMM, 2012).
- SPI de 9 meses: Refleja las condiciones de humedad en el suelo a mediano plazo, por ejemplo, un valor de SPI menor a -1,5 es clara evidencia del impacto de las sequías en el sector agrícola (OMM, 2012).
- SPI de 12 a 24 meses: En esta escala temporal se evidencian los comportamientos de la precipitación a largo plazo, está relacionada con los niveles de aguas superficiales y subterráneas (OMM, 2012).

2.1.6. Parámetros para caracterizar la sequía. Las características de un fenómeno de sequía se resumen en una gráfica (ver Fig. 5).

2.1.6.1. Inicio. El inicio de una sequía se establece cuando la precipitación está por debajo de lo establecido como normal (OMM, 2012).

2.1.6.2. Fin. El episodio finaliza cuando la precipitación para una determinada zona es equivalente a la climatología normal (OMM, 2012).

2.1.6.3. Duración. Todo episodio de sequía tiene una duración definida por su comienzo y su final, se define como el periodo de tiempo continuo de meses o años donde las precipitaciones registradas son inferiores a las determinadas como normales (Valarezo, 2017; Vega, 2018).

2.1.6.4. Intensidad. Se define como el valor promedio de una sequía, para el periodo de tiempo que dure el evento seco, o el tipo de sequía de acuerdo con una clasificación especificada, corresponde a la magnitud dividida entre la duración. En otros casos se define como el valor máximo de sequía alcanzado por el evento seco lo cual corresponde a la intensidad máxima para dicho tiempo con presencia de sequía (Vega, 2018).

2.1.6.5. Frecuencia. Consiste en el número de veces que se presenta algún tipo de sequía con respecto a un tiempo determinado y fijo (OMM, 2012).

2.1.6.6. Magnitud. Se define como el déficit acumulado de precipitación para cada periodo de sequía (OMM, 2012; Valarezo, 2017).

2.1.6.7. Distribución Espacial. Esta se logra con la interpolación de valores de sequía, que se obtiene por medio de los SIG, lo cual brinda un análisis espacial de la región y la identificación de áreas homogéneas con presencia del fenómeno.

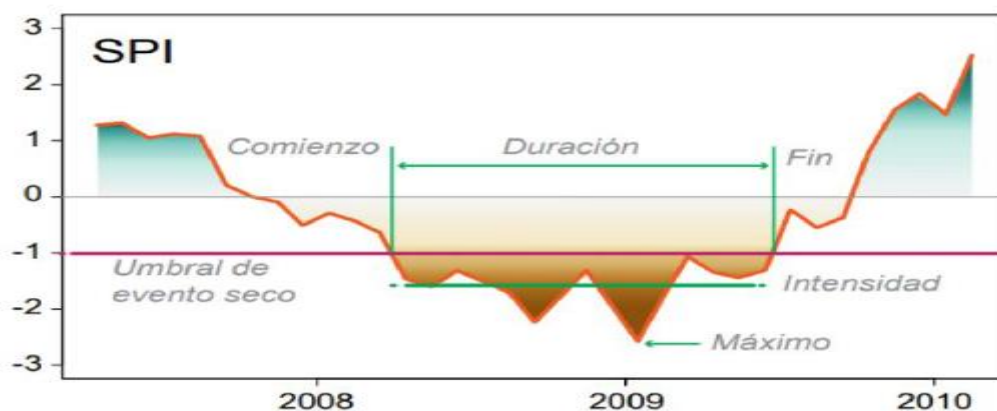


Figura 5. Características evento de sequía meteorológica. Adaptado de Valarezo (2017). Caracterización de las sequías meteorológicas en la cuenca del Paute mediante la aplicación del índice de precipitación estandarizado en diversas escalas temporales. Recuperado de <http://dspace.ucuenca.edu.ec/jspui/handle/123456789/28727>

2.1.7. Climatología. La climatología corresponde a los estudios para cuantificar los fenómenos que interactúan en la atmósfera, siendo determinada como los valores promedios o normales de cada variable del tiempo atmosférico en una serie de datos de por lo menos 30 años (Albentosa, 2015). En la actualidad se cuenta con un buen avance metodológico a la hora de establecer la climatología de cualquier variable atmosférica, esto gracias al avance de las ciencias físicas y matemáticas en concreto la estadística, se establece la aplicación del método estadístico a la climatología, lo cual consiste en aplicar todas las herramientas estadísticas posibles que nos permita caracterizar y comprender con mayor exactitud los diferentes componentes meteorológicos (Sánchez, 1977).

La variabilidad temporal y espacial del clima en Colombia obedece a diferentes factores e incluso algunos se desconocen, siendo puntuales, los más importantes hasta ahora son el fenómeno de El Niño, la localización en la franja tropical, la circulación de los vientos alisos, el ciclo de la zona de convergencia intertropical, la interacción de los océanos atlántico y pacífico, la influencia de la cordillera de los Andes, la circulación particular de la cuenca del Amazonas, entre otros (Mejía *et al.*, 1999; Trujillo, 2018).

La variabilidad de la precipitación impacta a la humanidad de diferentes formas: social, ambiental y económicamente. Una forma para mitigar o reducir dichos impactos es el conocimiento con anticipación de las fluctuaciones y tendencias climáticas, por lo tanto, es de gran interés su respectiva caracterización lo más confiable posible (Bocanegra y Pabón, 2000).

Además, a la hora de realizar el análisis de la aplicación de cualquier índice de sequía se requiere la cuantificación de los valores normales de la precipitación (Rivera, 2014).

2.1.8. Precipitación. Es una componente hidrológica que presenta alta variabilidad temporal y espacial, es muy común observar que mientras llueve en determinada zona, en otra zona aledaña no está ocurriendo lo mismo, esta variable es la de mayor interés en la parte de ingeniería debido a que viene a ser la causa de los fenómenos hidrológicos más importantes, su cuantificación correcta es uno de los mayores retos a la hora de estudiar esta variable climática (Quispe, 2012). Se refiere a el agua que se origina en las nubes, la cual llega a la tierra en sus diferentes estados, siendo el estado líquido el más importante a la hora de cuantificar la variable(Quispe, 2012).Operacionalmente, la precipitación es definida como la acumulación de lluvia por unidad de área horizontal; el agua que se almacena en un metro cuadrado de área y un milímetro de altura equivale en volumen a un litro de agua (Salinas, 2017).Esta cuantificación se hace por medio de un pluviómetro y por lo general una vez al día Rodríguez *et al.*, 2004 (citado por Salinas, 2017).

2.2. Marco Histórico.

2.2.1. La sequía a nivel mundial. La presencia de sequías ha sido un factor que ha afectado a las diferentes civilizaciones en todo el mundo, siendo una constante amenaza a la supervivencia de la humanidad (Ortega, 2012; Rivera, 2014). Entre los impactos más relevantes aparecen las frecuentes migraciones tanto en civilizaciones antiguas, como en sociedades modernas (Rivera, 2014).

2.2.2. La sequía en la antigüedad. Los grandes desastres ocasionados por la sequía han quedado registrados en los diferentes escritos que se tienen de historia, otras evidencias se han

dado a conocer por medio de mitos y leyendas; esta información ha sido corroborada por medio de hallazgos arqueológicos; aunque los escritos más antiguos sobre el fenómeno son los que se encuentran en la Biblia (Ortega, 2012).

Un ejemplo de los episodios mencionados anteriormente es el que se encuentra en (Jeremías 14:1-6 (Año 629 a.C) como se citó en (Ortega, 2012)) donde la sequía presento fuertes impactos en el pueblo de Judá.

Estudios realizados han demostrado que las sequías a través de la historia han generado conflictos sociales, lo que pudo causar la desaparición de civilizaciones completas, un ejemplo son la Acadia en Mesopotamia, la Tiwanaku y la Moche en Suramérica, la Anazasi en América del Norte, la Tolteca y la Maya en Mesoamérica (Ortega, 2012)).

Un estudio realizado en el año 2011 por la universidad de Saint Andrews Reino Unido con sedimentos del lago Tana en Etiopía, lograron descubrir la variación de los niveles de agua en los últimos 17000 años donde se evidencian fuertes periodos de sequías, un ejemplo fue la ocurrencia de un periodo muy severo hace 4200 años, lo cual pudo sumarse a las causas de la desaparición del Imperio Egipcio, este evento llevo a puntos extremos donde los humanos se vieron obligados a comerse a sus propios hijos obedeciendo a los códigos de supervivencia; este periodo de sequía ha sido corroborado por el equipo Saint Andrews en conjunto con la universidad Aberystwyth Inglaterra. Se debe resaltar que la gravedad de esta sequía se presenta en algunas regiones de África en la actualidad (Ortega, 2012).

La universidad de Columbia, Estados Unidos entre 1996 y 2011 y su equipo de investigadores, analizaron los anillos de 300 árboles distribuidos en Asia, donde se evidencia la presencia de cuatro sequías severas en un periodo de 700 años, donde resalta la ocurrida en 1644

la cual es calificada como la más fuerte en los últimos 500 años, esta tuvo una duración de 3 años y fue un factor determinante en la caída de la dinastía Ming (Ortega, 2012).

Los anillos de varias Tecas en Tailandia y Cipreses Vietnamitas indican que el Oeste de la India también se vio gravemente afectado por los episodios secos, estos periodos donde está presente el fenómeno de la sequía coinciden con el colapso de los reinos de los actuales Vietnam, Tailandia y Birmania (Ortega, 2012). La sequía más fuerte fue en la era victoriana entre 1876 y 1878, según los anillos de los arboles esta falta del recurso hídrico fue especialmente severa en la India, extendiéndose hasta China y actual Indonesia, este fenómeno afecto los trópicos provocando hambrunas y la muerte de 30 millones de personas, el hambre y el cólera llevaron a la población a revolucionarse contra Francia (Ortega, 2012).

2.2.3. La sequía en Colombia. La primera sequía reportada en Colombia fue en 1925 cuando dio inicio un evento seco que duro hasta el siguiente año, el cual se le atribuye a la presencia del fenómeno de El Niño Oscilación del sur ENSO, en este lapso de tiempo se deterioró la economía de la época lo que causo un amplio malestar social cuyas implicaciones políticas se reflejaron en el cambio de gobierno el cual estaba a cargo del partido conservador desde casi 50 años y perdió las elecciones en 1930 frente al partido liberal (Barrero, 2005).

Como la presencia del fenómeno de El Niño está altamente relacionada con la presencia de las sequías más severas en Colombia, entonces se resumirán los eventos del fenómeno de El Niño presentes en la historia del país. Se clasificó la presencia del fenómeno del niño en los últimos 50 años, teniendo presencia del evento el seco en los años 1951, 1953, 1957, 1958, 1963, 1965, 1969, 1972, 1976, 1977, 1982, 1983, 1986, 1987, 1991, 1992, evidenciando que el fenómeno presenta una frecuencia de ocurrencia que oscila entre 1 y 4 años (Carvajal *et al.*, 1998).

Se encontró que la región Andina es la más afectada por el fenómeno de la sequía, ocurriendo las más fuertes en los mismos años que se presentó el fenómeno de El Niño como lo fue los años de 1972, 1976, 1977, 1991 y 1992, siendo la sequía de este último año la que ocasiono un fuerte racionamiento de energía durante un año y pérdidas de cosechas, lo cual indica que El Niño es el evento que mayor impacto causa en la economía nacional (Carvajal *et al.*, 1998).

En el año 2014 se presentó un gran periodo de sequía que dejo miles de reses muertas y afecto el sector agrícola en la región del caribe y en otros departamentos del país (Dinero,2014); con esto se dio inicio en el 2015 al fenómeno de El Niño que duro hasta el primer trimestre de 2016 siendo conocido como uno de los más fuertes en la historia del planeta, desencadenando una serie de calamidades en gran parte del país, de acuerdo con el IDEAM durante estos meses las lluvias se redujeron entre el 30% y el 400% y en promedio el 80% de las zonas con influencia de El Niño, aumento la temperatura cerca de 2,5 grados Celsius; se alcanzaron valores máximos históricos de temperatura, como el registrado en Puerto Salgar (Cundinamarca) que fue de 45°C medidos a la sombra, de igual forma en tres zonas del país se registraron anomalías en la temperatura promedio, se trató de Convención en Norte de Santander, Natagaima en Tolima y Chachaqui en Nariño que presentaron niveles superiores a los 5°C según lo establecido como normal como lo describe (Vida,2016).

Según el Fondo Nacional del Ganado se reportó la muerte de 32000 reces, pero se calcula que pudo haber entre 40000 y 45000, debido a que la mayoría de los pequeños productores no reportaron la muerte de sus animales. Esta sequía dejo en los niveles históricos más bajos al rio Magdalena y más de 200 municipios en calamidad por desabastecimiento de agua y 14 incendios en promedio durante los 15 meses que tuvo de duración (Dinero, 2014). En total Colombia

perdió 188650 ha de bosque a causa de los incendios forestales, además la nación gastó 1,6 billones de pesos en prevención y atención de emergencias (Vida, 2016).

2.3. Marco Legal

La normatividad relacionada con el tema de las sequías se resume en la Tabla 1

Tabla 1.

Normativa Relacionada con las Sequías.

Norma	Descripción
Ley 461 de 1998	Convención de las Naciones Unidas de la lucha contra la desertificación en los países afectados por sequía grave o desertificación, en particular África (Miniambiente, 2014).
Ley 99 de 1993	Por la cual se crea el ministerio del medio ambiente, se reordena el sector público encargado de la gestión y conservación del medio ambiente y los recursos naturales renovables, se organiza el Sistema Nacional Ambiental SINA, y se dictan otras disposiciones, las cuales regulan el uso de los recursos naturales, prevención de los desastres naturales, protección y recuperación ambiental del país, entre otros (Senado de la República, 2019).
Decreto 2811 de 1974	Por el cual se dicta el código nacional de los recursos naturales renovables y protección del medio ambiente (Minambiente, s.f).
Decreto 1323 de 2012	Por la cual se adopta la política nacional de gestión del riesgo de desastres y se establece el sistema nacional de gestión del riesgo de desastres y se dictan otras disposiciones (Departamento de la República, 2012).
Ley 164 de 1994	Por medio de la cual se aprueba la

	Convención Marco de las Naciones Unidas sobre el Cambio Climático (IDEAM, 2015).
Política para la gestión del recurso hídrico	El presente documento contiene la Política Nacional para la Gestión Integral del Recurso Hídrico (PNGIRH) que establece los objetivos, estrategias, metas, indicadores y líneas de acción estratégica para el manejo del recurso hídrico en el país, en un horizonte de 12 años (Minambiente, 2010).
Ley 1574 de 2012	Por medio de la cual se establece la Ley General de Bomberos de Colombia, con el objeto de articular los esfuerzos públicos y privados para la prevención y atención de incendios, explosiones y demás calamidades conexas, haciendo parte del sistema nacional para la prevención y atención de desastres (Senado de la República, 2012).
Decreto 1974 de 2013	Por el cual se establece el procedimiento para la expedición y actualización del Plan Nacional de Gestión del Riesgo (Departamento Administrativo de la Presidencia de la República, 2013).

3. Metodología

3.1. Delimitación del área de estudio

Se realizó con información obtenida del geoportal del Instituto Geográfico Agustín Codazzi, debido a que es la entidad encargada de la generación de información pública oficial del país en materia de geografía y cartografía. El área de estudio se determinó así: primero se descargó la información cartográfica accediendo al geoportal del IGAC en la siguiente ruta de enlace <https://geoportal.igac.gov.co/contenido/datos-abiertos-cartografia-y-geografia>, de ahí se

descargó la información correspondiente a la cartografía de cubrimiento nacional a escala 1:100000 en formato shapefile; de esta información se seleccionaron los shapefiles de municipios, drenajes, vías y curvas de nivel, luego con la ayuda del software QGis 3.6.2 y las herramientas de geoproceto se recortaron los 12 municipios que conforman la provincia de García Rovira, de estos municipios se construyó el polígono de la provincia el cual equivale al área de estudio, luego se recortó la información adicional como vías, drenajes y curvas de nivel fijando como limite el polígono del área de estudio; toda la información geográfica espacial está definida en el sistema de referencias para la zona el cual es Colombia MAGNA-SIRGAS/Colombia Bogotá zone (3116 es el código de identificación del sistema de coordenadas), la conversión de coordenadas al sistema 3116 se realizó haciendo uso del software QGis 3.6.2.

El área de estudio definida anteriormente está ubicada en la parte este del departamento de Santander, el cual a su vez se encuentra situado en la cordillera oriental perteneciente a la región Andina Colombiana. La provincia de García Rovira limita por la parte norte con el departamento de Norte de Santander, por la parte sur y oriental con el departamento de Boyacá y por la parte occidental limita con las provincias de Soto y Guanenta pertenecientes al mismo departamento de Santander; la provincia está conformada por los siguientes municipios: Capitanejo, Carcasí, Cerrito, Concepción, Enciso, Guaca, Macaravita, Málaga, Molagavita, San Andrés, San José de Miranda, San Miguel (ver Fig. 6). El estudio a nivel temporal se llevó a cabo desde el año 1979 hasta el año 2016.

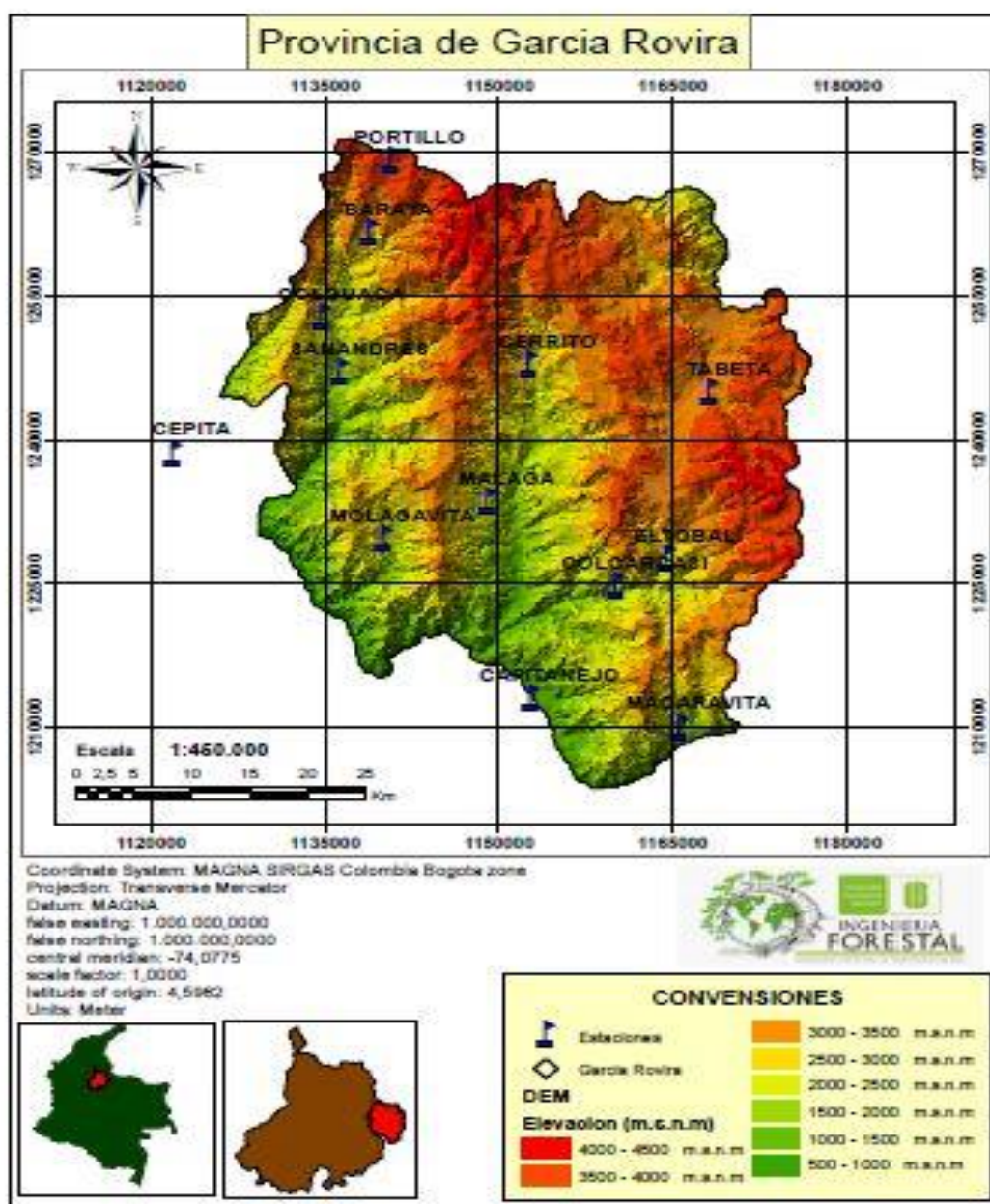


Figura 6. Área de Estudio.

3.2. Adquisición de datos.

Se descargó el shapefile de las estaciones meteorológicas, hidrológicas e hidrometeorológicas de Colombia del geoportal del IDEAM en la siguiente dirección

<http://www.ideam.gov.co/solicitud-de-informacion> y con la ayuda del software QGis 3.6.2 y las herramientas de geoproceto se recortaron las estaciones que pertenecen a la provincia de García Rovira y que se encuentran en estado activo, además se tuvo en cuenta la estación Cepita con el fin de contar con mayor información para realizar la interpolación y obtener un mejor resultado espacial; para lograr una mejor interpolación se deben tener en cuenta puntos internos como externos del área límite de interpolación; las estaciones externas o de apoyo no deben estar a una distancia mayor de 20 km del área de estudio (Panés *et al.*, 2017).

Antes de realizar la solicitud de la información meteorológica se debe crear un usuario en la plataforma virtual del IDEAM en el siguiente enlace.

<http://institucional.ideam.gov.co/jsp/loader.jsf?lServicio=Usuarios&lTipo=usuarios&lFucion=>

Se realizó la solicitud de los datos meteorológicos mensuales para las estaciones clasificadas anteriormente ver Tabla 2. La solicitud se realizó ante el IDEAM por medio del correo electrónico atencionalciudadano@ideam.gov.co y del geoportal mencionado en el enlace anterior, luego se ingresa con el usuario creado con antelación. Después de acceder con el usuario en la página del IDEAM se seleccionan las estaciones, la información necesaria, con la frecuencia requerida (diaria, mensual o anual) y para el periodo de tiempo deseado siempre y cuando la información ya exista en el banco de datos del IDEAM.

Tabla 2.

Solicitud de información meteorológica de las estaciones ante el IDEAM.

ID	Código	Nombre	X (Longitud m)	Y (Latitud m)	Z (Altitud m)	Estado
1	24030210	Cerrito	1152582,00846	1247929,28343	2440	Activa
2	24030320	Col. Carcasí	1160082,87633	1224864,70348	2024	Activa

3	24030290	Macaravita	1165507,22088	1210105,97487	1856	Activa
4	24030340	Molagavita	1140006,77324	1229695,38054	2150	Activa
5	24030270	San Andrés	1136337,34366	1247200,18803	1702	Activa
6	24030630	Baraya	1138787,02264	1261617,45572	2927	Activa
7	24035260	Capitanejo	1152747,38368	1213031,91699	1160	Activa
8	24030750	Col. Guaca	1134756,72186	1252849,83550	2400	Activa
9	24030680	El Tobal	1164406,76187	1227735,33809	2394	Activa
10	24030950	Málaga	1149028,48638	233560,26987	2237	Activa
11	37010060	Portillo	1140670,40466	1269089,22283	3824	Activa
12	37010050	Tabeta	1168193,40382	1245109,42767	3168	Activa

3.3. Pre procesamiento de los datos

Se da a saber a partir de la siguiente secuencia:

3.3.1. Ordenar los datos obtenidos. En primera instancia después de haber obtenidos los datos de precipitación del IDEAM, se ordenaron en la plantilla correspondiente ver Tabla 3, en este caso se ordenan los datos de acuerdo a los requerimientos por la aplicación SPI Generator ofrecida por el centro nacional de mitigación de sequías de la universidad de Nebraska descargada en el siguiente enlace. <https://drought.unl.edu/droughtmonitoring/SPI/SPIProgram.aspx>, esta aplicación fue diseñada por McKee y colaboradores en 1993 (Ortega, 2012). Además, el software R Project ofrece una librería para el cálculo del índice estandarizado de precipitación llamada "SPEI" la cual requiere los datos de precipitación ordenados en la misma plantilla requerida por la aplicación mencionada anteriormente.

Tabla 3.*Plantilla para ordenar los datos de precipitación.*

ID	Año	Mes	PP
1	1959	7	16
2	1959	8	0
3	1959	9	110
4	1959	10	19
5	1959	11	
6	1959	12	
7	1960	1	12
8	1960	2	31
9	1960	3	0
10	1960	4	83
11	1960	5	0
12	1960	6	108

3.3.2. Periodo de tiempo de datos. Se debe tener en cuenta un periodo de 30 años como mínimo, requerimiento para la estimación de los parámetros de cualquier distribución con el objetivo de minimizar la influencia de la oscilaciones climáticas naturales (Lamb y Changnon, 1981). Para lograr estabilidad en el valor medio y la distribución de probabilidades son requeridos entre 30 a 50 años de datos de precipitación continuos; y para estimar de forma más exacta la asimétrica y la curtosis son requeridos entre 60 y 70 años de registros continuos (Rivera, 2014).

Para fines de esta investigación se logró tener un registro de 38 años como mínimo, aunque seis de las 13 estaciones cuentan con registros de precipitación de 58 años logrando de tal manera una estabilización en el valor promedio y la distribución de probabilidades como lo establece (Rivera, 2014) (ver Tabla 5).

3.3.3. Completitud de los datos. A continuación, se procedió a determinar la completitud de los datos teniendo en cuenta lo establecido por diferentes autores como (Paredes *et al.*, 2008;

Díaz *et al.*, 2014; Rivera, 2014; Panes *et al.*, 2017; Loaiza, 2018) de los cuales se puede concluir que son aceptables entre 2 a 20% de datos faltantes en los registros de precipitación; se aclara que entre menor sea el porcentaje de datos faltantes mejores condiciones probabilísticas presenta la estación (OMM, 2012). En la presente investigación se consideraron aquellas estaciones que no tuvieran más del 10% de datos faltantes como lo establece (Díaz *et al.*, 2014; Arriaga *et al.*, 2017) (ver Tabla 5), debido a que este umbral es posible de alcanzar por todos los registros de precipitación de las diferentes estaciones tenidas en cuenta en el estudio. Este procedimiento se realizó por medio del software Excel 2016, por medio de una regla de tres, tomando el total de meses del registro como el 100%, y se determina el porcentaje equivalente al número de meses con datos faltantes de cada estación.

3.3.4. Distribución espacial. Con el fin de obtener mejores resultados con respecto a la parte espacial, se debe tener en cuenta que las estaciones presenten una distribución espacial lo más uniforme posible; debido a que la inclusión de información redundante podría tener efectos no deseados y posibles sesgos de la información en los resultados (Rivera, 2014).

Se deben tener en cuenta criterios como: no más de cinco estaciones por cada estación de referencia ubicadas dentro de un perímetro de 50 km (Panes *et al.*, 2017), este procedimiento se realizó por medio del software Qgis 3.6.2 y la herramienta de geoproceso buffer, con la cual se crearon los perímetros de 50 km alrededor de cada estación. El otro criterio es que no se presenten más de cinco estaciones en la misma unidad climática (Panes *et al.*, 2017), este proceso se llevó a cabo mediante el software Qgis 3.6.2 en el cual se sobrepusieron los shapefiles de las estaciones y de las unidades climáticas correspondiente al polígono de García Rovira descargados previamente del geoportal del IDEAM.

No se eliminó ninguna estación debido a que se cumplió con el ítem requerido por unidad climática (ver Fig. 7), además que los análisis de distribución espacial se obviaron debido a que la red de estaciones presentes en la región fue establecida por el IDEAM, el cual debió realizar los respectivos estudios para determinar su distribución espacial.

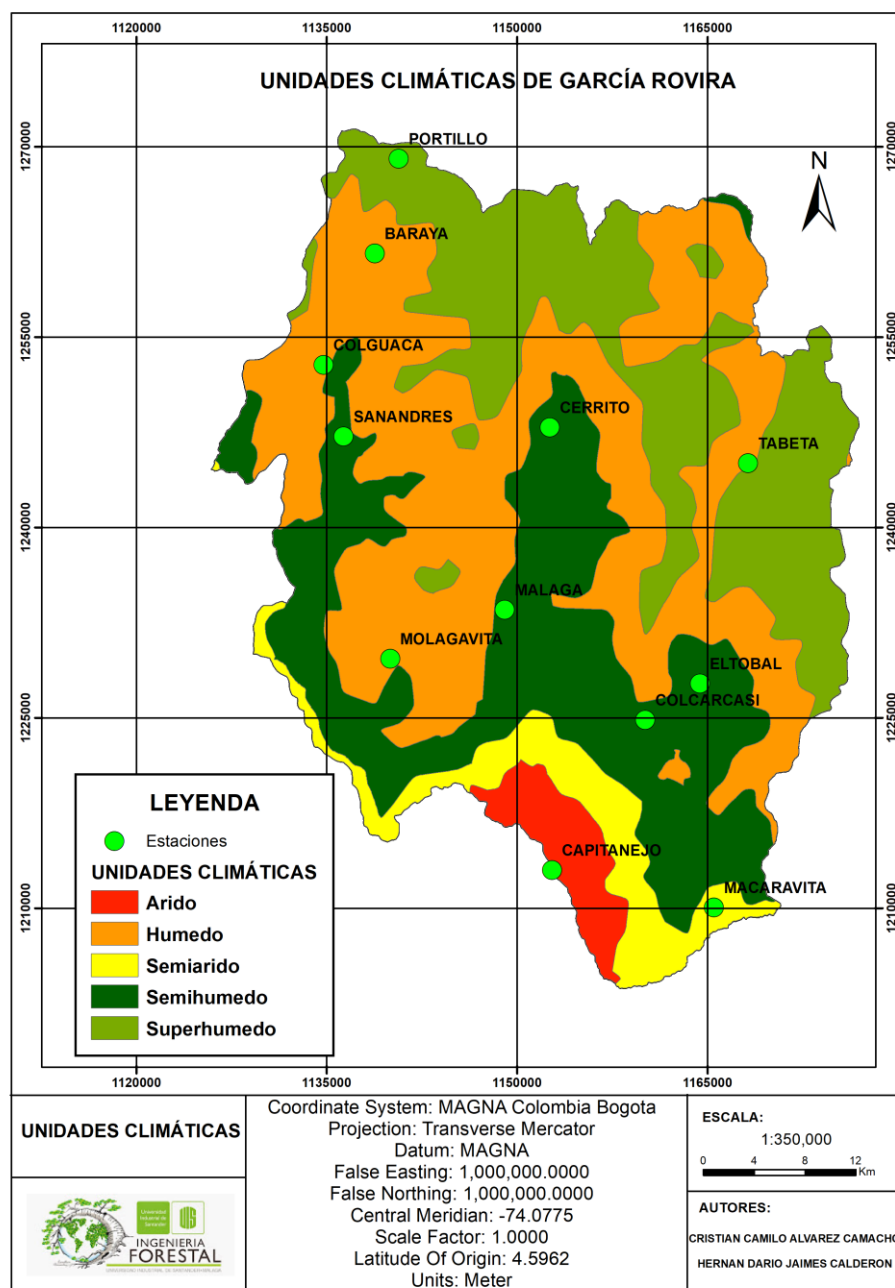


Figura 7. Distribución unidades climáticas.

3.3.5. Consistencia de los datos. Luego se determinó la consistencia de los datos, para lo cual se estimaron como datos inconsistentes de cada serie mensual para cada estación, aquellos que fueran mayores a la media más cuatro veces la desviación estándar de los mismos, utilizando la siguiente ecuación $PPE = PPU + 4 * SU$, para ejecutar la ecuación se tienen en cuenta únicamente los registros en los cuales la precipitación es mayor a cero (Rivera, 2014). Este procedimiento se llevó a cabo de forma automatizada en el software estadístico de programación R Project y sus respectivos comandos.

A continuación, se procedió a analizar si los valores obtenidos como inconsistentes corresponden a acumulados de precipitación extremos o existen errores tipográficos y el valor resulto ser menor, para lo cual se compararon los datos de precipitación de la misma fecha con la estación más cercana y que presenten una correlación lineal alta ver Tabla 4 con un $R^2 > 0,6$ ver Tabla 9 según lo establece (Rivera, 2014). Con los extremos secos no hubo problema debido a que los datos faltantes de la base de datos aparecen sin dato y cuando no hay acumulado de precipitación tiene como valor cero, siendo cero un valor común de encontrar en la base de datos.

Tabla 4.

Clasificación correlación de Pearson

Valor de r^2	Tipo de correlación
$r = 1$	Correlación perfecta
$0,8 < r < 1$	Correlación muy alta
$0,6 < r < 0,8$	Correlación alta
$0,4 < r < 0,6$	Correlación moderada
$0,2 < r < 0,4$	Correlación baja
$0 < r < 0,2$	Correlación muy baja
$r = 0$	Correlación nula

*Nota: Clasificación de correlación de Pearson. Adaptado de Valarezo (2017). Caracterización de las sequías meteorológicas en la cuenca del Paute mediante la aplicación del índice de precipitación estandarizado en diversas escalas temporales. Recuperado de <http://dspace.ucuenca.edu.ec/jspui/handle/123456789/28727>

3.3.6. Estimación de datos faltantes. A continuación, se procedió a estimar los datos faltantes debido a que la metodología a implementar en esta investigación no permite matrices con datos ausentes. Para estimar estos datos se tuvo en cuenta lo siguiente: en primera instancia se calcularon los datos faltantes con las estaciones que tengan una correlación lineal alta con un $R^2 > 0.6$ ver Tabla 9, con la estación que presenta el dato faltante, si se cumple el criterio de correlación se calculan los datos faltantes teniendo en cuenta los datos reales para la misma fecha presentes en la estación correlacionada según lo establece (Rivera, 2014), para lo cual se implementa la ecuación sugerida por Pichardo (2006) (ver ecuación 1).

$$VA = (MA/MB) * VB$$

Donde:

VA = Valor del dato faltante.

MA = Valor medio de precipitación de la estación A para el mes faltante.

MB = Valor medio de la precipitación para el mismo mes de la estación A.

VB = Dato real mensual de precipitación en la estación B, para la misma fecha del dato faltante en la estación A.

Cuando la estación con datos faltantes no cumplió el criterio de correlación establecido con ninguna otra estación del estudio, o el dato es faltante en todas las estaciones correlacionadas, se procedió hacer el llenado de datos con la media o la mediana de los mismos datos, de acuerdo a los resultados de una prueba de bondad de ajuste, llevada a cabo mediante el test de lilliefors con un nivel de significancia de 0.05 ver Tabla 11, este test es la actualización del test de kolmogorov smirnov; además se verificó que este test fuera el más acorde para realizar la prueba de bondad de ajuste, esto se llevó a cabo comparando el resultado del test de lilliefors y de la prueba de kolmogorov smirnov ver Tabla 10 con los histogramas de los mismos datos (ver Fig.

13) (ver Fig. 14) (ver Fig. 15). El test de lilliefors se lleva a cabo mediante una prueba de hipótesis, donde la hipótesis nula es que la serie de datos de cada mes tiene una distribución normal o de Gauss, cuando esta se acepta los datos faltantes se llenan con el valor promedio de cada mes; y la hipótesis alternativa es que los datos no tienen una distribución normal, cuando esta es aceptada se llenan los datos con el valor de la mediana de cada mes según lo establecen (Pizarro *et al.*, 2003; Quispe, 2012; Rivera, 2014). Este procedimiento se llevó a cabo de forma automatizada en el software estadístico R Project y sus respectivos comandos.

3.3.7. Homogeneidad de los datos. Por último, se realizó la prueba de homogeneidad de los datos, con el fin de determinar si existen estaciones con cambios importantes en la media de la serie de tiempo que no obedezcan a la variabilidad interanual de la dinámica natural del clima, sino que se debe a posibles cambios de instrumentos, cambios de emplazamiento, cambios de observador o de entorno entre otros (Guenni *et al.*, 2008), debido a que los datos climáticos son muy sensibles a estos hechos (Guenni *et al.*, 2008). Además, la prueba de homogeneidad de los datos es importante para explorar y detectar un posible cambio climático en la región con respecto a la variable precipitación (Puertas *et al.*, 2011).

Para llevar a cabo este procedimiento se tiene en cuenta la prueba no paramétrica test de Mann Kendall debido a que es la prueba sugerida para evaluar la tendencia en series de datos ambientales y es el método más apropiado para analizar tendencias en series climatológicas (Da silva, 2017). Esta prueba se realizó con un nivel de significancia del 0.05, mediante una prueba de hipótesis, tomando como hipótesis nula que los datos que conforman la serie temporal son variables aleatorias, independientes e igualmente distribuidas y se acepta la hipótesis alternativa cuando existe un cambio en la serie temporal según (Méndez *et al.*, 2008; Muñoz *et al.*, 2008;

Andrade, 2015; Paredes *et al.*, 2015; Alcántara *et al.*, 2019) (ver Tabla 12). Este procedimiento se llevó a cabo de forma automatizada en el software R Project y sus respectivas librerías y comandos para llevar a cabo dicha prueba.

3.4. Comportamiento normal de la precipitación.

Para determinar los valores mensual más representativos de las diferentes estaciones se hace la aplicación del método estadístico (Sánchez, 1977). Este método consiste en aplicar las diferentes técnicas estadísticas con el fin de dar un mayor soporte y descripción de la climatología.

En primera instancia se desprecian los valores atípicos, para lo cual la estadística establece como valores atípicos superiores, aquellos que sean mayores al valor resultante de la suma del tercer cuartil con el producto de 1,5 veces el rango intercuartílico; con los valores atípicos inferiores no hay problema debido a que el valor más bajo posible será de cero y es normal que aparezca en la serie de datos.

Tabla 5.
Estaciones aptas para el estudio

ID	Código	Nombre	Periodo	% Datos Faltantes	Estado
1	24030210	Cerrito	1959 - 2016	0,28	Activa
2	24030320	Col. Carcasí	1959 - 2016	3,87	Activa
3	24030290	Macaravita	1959 - 2016	2,01	Activa
4	24030340	Molagavita	1959 - 2016	4,59	Activa
5	24030270	San Andrés	1959 - 2016	4,16	Activa
6	24030630	Baraya	1979 - 2016	2,19	Activa
7	24035260	Capitanejo	1979 - 2016	4,6	Activa
8	24030750	Col. Guaca	1979 - 2016	2,85	Activa
9	24030680	El Tobal	1979 - 2016	2,19	Activa
10	24030950	Málaga	1979 - 2016	6,35	Activa
11	37010060	Portillo	1979 - 2016	10,08	Activa
12	37010050	Tabeta	1979 - 2016	2,85	Activa

Luego se aplicó una prueba de normalidad a los datos mensuales de cada estación mediante el test de lilliefors con el fin de determinar el valor más representativo entre la media y la mediana de cada serie de datos mensual, el cual representara la climatología de los mismos. Si los datos obedecen a una distribución normal el dato más representativo será la media, si los datos no tienen una distribución normal el dato más representativo será la mediana.

Posteriormente se aplicó la estadística para representar los valores normales de precipitación de cada serie mensual de datos, los cuales se clasifican en dos grupos los estadísticos de tendencia central como la media y la mediana y los de dispersión en los cuales se tendrá en cuenta el valor mínimo, el valor máximo, la amplitud, los cuartiles, la distancia intercuartílica, la desviación estándar y el coeficiente de variación según lo establecido por (Sánchez, 1977; Albentosa, 2015).

Complementario a lo anterior se realiza un gráfico por cada estación donde se resumen los estadísticos mencionados anteriormente para cada mes, mediante un gráfico con diagramas de cajas y bigotes internos, a la hora de construir los gráficos se tiene en cuenta lo establecido por (Correa y Gonzáles, 2002). Todo lo mencionado se realiza de forma automatizada en software R Project y sus respectivos comandos estadísticos.

Por último, se realiza la distribución espacial de los valores más representativos de la precipitación en la provincia de García Rovira por medio de isoyetas para cada mes del año y una isoyeta anual, este procedimiento se aplicó por medio del software ArcGis 10.3 y su herramienta de interpolación kriging debido a que es el método de interpolación más idóneo para este tipo de datos (Mejía *et al.*, 1999; Poquet *et al.*, 2008). El método kriging tienen un suavizado de los valores máximos y mínimos de la precipitación mensual de cada serie de tiempo (Poquet

et al., 2008). Finalmente, se generarán los respectivos mapas para cada mes con la información respectiva de las interpolaciones.

3.5. Cálculo y caracterización de las sequías

Se eligió calcular el SPI con la librería disponible en el software R Project llamada "SPEI", esto se hizo debido a que la aplicación SPI Generator que nos ofrece el centro nacional de mitigación de sequías de la universidad de Nebraska no funciono de forma correcta, o se llevó a cabo una ejecución que no es apta para la aplicación, arrojando resultados que no son acordes a los valores de SPI.

El cálculo de las sequías meteorológicas en la región se llevó a cabo mediante la utilización del SPI, método diseñado por McKee et al 1993 (Poquet et al., 2008), el cual se basa en un registro de datos de precipitación mayor a 30 años continuos; esta investigación se realizó con un periodo de tiempo de 38 años. Los datos de precipitación para cada una de las series mensuales de tiempo se ajustan a una distribución de probabilidad (a la que mejor se ajuste), el cálculo de dicha distribución de probabilidad de ajuste se llevó a cabo mediante el test Gamma ver Tabla 26. Los valores de la función de ajuste son luego transformados en una distribución normal estandarizada con valor de la media igual a cero y varianza igual a uno, el resultado de esta transformación corresponde al SPI según (OMM, 2012); este índice nos indica el valor de la desviación estándar en que el valor normalizado de la precipitación se aleja del valor promedio para la serie de datos, siendo los valores negativos los correspondientes a sequía y los valores positivos a humedades (Moreno *et al.*, s.f; Poquet *et al.*, 2008; Loaiza, 2018). Este índice se calculó para una escala de tiempo de un mes, debido a que es la escala más apta para calcular

sequías meteorológicas (OMM, 2012). Este procedimiento se llevó a cabo para todas las estaciones tenidas en cuenta en la investigación de forma automatizada en el software R Project y sus respectivas librerías y comandos estadísticos, el cálculo del SPI se realizó por medio de la librería de R Project llamada "SPEI".

Tabla 6.

Clasificación Índice Normalizado de Precipitación (SPI) de acuerdo con su intensidad.

Valor de SPI	Clasificación
>2.0	Extremadamente húmedo
1.5 a 1.99	Muy húmedo
1.0 a 1.49	Moderadamente húmedo
-0.99 a 0.99	Normal o aproximadamente normal
-1.0 a -1.49	Moderadamente seco
-1.5 a -1.99	Severamente seco
<-2	Extremadamente seco

**Nota:* Clasificación de las sequías meteorológicas de acuerdo a su intensidad. Adaptado de OMM (2012). Índice normalizado de precipitación guía del usuario. Recuperado de http://www.droughtmanagement.info/literature/WMO_standardized_precipitation_index_user_guide_es_2012.pdf

Para determinar los distintos tipos de sequía de acuerdo con su intensidad, clasificando los valores de SPI, se utiliza el sistema de clasificación elaborado por McKee y otros en 1993 (OMM, 2012) ver Tabla 6.

Posteriormente se procedió a caracterizar la sequía, para lo cual se tuvo en cuenta el inicio de un periodo seco cuando los valores de SPI son iguales o menores a menos uno, y este finaliza cuando los valores de SPI son mayores a menos uno, la duración corresponde al lapso continuo con valores de SPI menores o iguales a menos uno según lo establece (OMM, 2012; Valarezo, 2017; Loaiza, 2018). La intensidad consiste en el valor promedio alcanzado por el SPI en el tiempo que dura el mismo evento de sequía, este se calcula promediando los valores inferiores o iguales a menos uno; cuando se habla de la intensidad máxima entonces corresponde al valor más bajo alcanzado por el SPI en un periodo de sequía (Valarezo, 2017;). La magnitud se calculó

sumando todos los valores del SPI con un valor igual o inferior a menos uno y se multiplico por menos uno con el fin de que la sumatoria nos arroje un valor positivo (OMM, 2012; Valarezo, 2017), la magnitud se clasifica de la siguiente manera ver Tabla 7. La frecuencia consiste en el número de veces que se presenta algún tipo de sequía con respecto a un tiempo determinado y fijo, en este caso será el total del periodo de tiempo de la serie de datos (OMM, 2012; Valarezo, 2017). La caracterización de las sequías se realizó de forma automatizada en el software R Project y sus respectivos comandos.

Tabla 7.
Clasificación del SPI de acuerdo con su Magnitud.

Magnitud Sequía	Categoría
0,1 a 0,9	Normal
1 a 1,99	Leve
2 a 2,99	Poco fuerte
3 a 3,99	Fuerte
4 a 4,99	Muy fuerte
>5	Extremadamente fuerte

*Nota: Clasificación de las sequias meteorológicas de acuerdo a su magnitud. Adaptado de OMM (2012). Índice normalizado de precipitación guía del usuario. Recuperado de http://www.droughtmanagement.info/literature/WMO_standardized_precipitation_index_user_guide_es_2012.pdf

Como complemento, en el mismo software R Project y de forma automatizada se elaboraron los gráficos del SPI de todas las estaciones, donde se reflejan los periodos secos y sus características estos se realizaron teniendo en cuenta las sugerencias dadas por (Correa y Gonzáles, 2002).

Otro ítem en la caracterización de la sequía es la distribución espacial la cual se llevó a cabo para los periodos de sequía más representativos en alguna de sus características anteriores, esto se llevó a cabo por medio del software ArcGis 10.3 y su herramienta de interpolación kriging. En

este software también se elaboraron los respectivos mapas de las características de las sequías meteorológicas.

3.6. Influencia del fenómeno de El Niño sobre el SPI.

La caracterización del fenómeno de El Niño se realizó por medio de los valores del Índice Oceánico Niño (ONI por sus siglas en ingles), debido a que es el índice oceánico más utilizado por la comunidad científica a nivel mundial (Arango et al., 2014), además el ONI representa las condiciones de la TSM en la zona 3.4, la cual realiza la medición de la temperatura en la parte central del océano Pacífico, frente a las costas de Colombia, Ecuador y Perú (Vega, 2018), lo cual es favorable para esta investigación.

Para llevar a cabo este objetivo primero se descargó del geoportal del centro de predicción climática de la Administración Nacional Oceánica y Atmosférica (NOAA), los valores del ONI ya calculados para el periodo de tiempo homologado al análisis de sequía de este estudio; estos datos se descargaron del siguiente enlace https://origin.cpc.ncep.noaa.gov/products/analysis_monitoring/ensostuff/ONI_v5.php

Estos valores se ordenaron en un archivo .Excel 2 se multiplicaron por menos uno con el fin de que los valores correspondientes al fenómeno de El Niño queden con valores negativos y los correspondientes al fenómeno de La Niña con valores positivos, estos datos se guardaron en un archivo csv con el fin de hacer su posterior lectura en el software R Project, donde se realizó la caracterización de los diferentes eventos de El Niño, para lo cual, se identifica el inicio, el fin, la duración, la intensidad media, la intensidad máxima, la magnitud y la frecuencia con respecto al periodo total de tiempo del estudio, esto se realizó para cada evento. Los periodos del fenómeno

de El Niño se determinaron cuando los valores del ONI alcanzaron un valor de -0.5 con mínimo tres meses de anomalías consecutivas (León *et al.*, 2017); la intensidad de los eventos de El Niño se clasificó de la siguiente manera ver Tabla 8.

Tabla 8.
Clasificación ONI.

Valor ONI	Clasificación
-0,5 a 0,99	Niño Débil
-1 a -1.99	Niño Moderado
<-1,45	Niño fuerte

**Nota:* Clasificación del índice oceanic niño index de acuerdo a su intensidad promedio. Adaptado de (León *et al* 2017). Efectos económicos de futuras sequías en Colombia: Estimación a partir del fenómeno el niño 2015. Recuperado de <https://colaboracion.dnp.gov.co/CDT/Estudios%20Econmicos/466.pdf>

Luego se realizó la correlación lineal entre el índice ONI con los diferentes valores de SPI correspondientes a cada estación, con el fin de determinar si los periodos de sequía tienen alguna relación con la presencia del fenómeno de El Niño; este proceso se llevó a cabo por medio del coeficiente de correlación de Pearson, el cual arroja valores desde menos uno hasta uno, presentado mayor correlación cuando los valores se acercan a uno y a menos uno, y son totalmente independientes cuando los valores se acercan al cero (Arango *et al.*, 2014); también se elaboraron los respectivos gráficos de las diferentes correlaciones. Todo esto se llevó a cabo de forma automatizada en el software R Project y sus respectivos comandos.

3.7. Automatización de la Metodología

Debido al avance y del desarrollo tecnológico en la actualidad se pueden llevar a cabo más rápidos y precisos procedimientos de manipulación de datos logrando cuantificar y automatizar las diferentes metodologías (Bande, 2012). Para esta investigación se cuenta con una base de

datos de precipitación amplia a la cual hay que aplicarle una gran variedad de técnicas estadísticas, lo cual nos indica que es más óptimo trabajar de forma automatizada. Para este caso el software más indicado es el R Project debido a que es el de mayor avance en la parte estadística. Para llevar a cabo la automatización se enlazo el programa R Project desde la plataforma de Jupyter, la cual nos permite organizar el programa de una forma óptima, ayudando en el entendimiento del lector del programa; a la hora de automatizar la metodología fue necesario usar una gran variedad de comandos estadísticos y de funciones creadas especialmente para llevar a cabo ciertos procedimientos. Es necesario recalcar el uso de la familia apply y sus diferentes derivadas en R Project, necesarias para ejecutar las diferentes funciones en la totalidad de la base de datos que se tiene como insumo para el programa y de la forma que se requiere; también se utilizaron los diferentes comando para leer y escribir la información deseada, la mayoría de extensiones fueron "xlsx", "csv", "jpeg" "pdf"; fue muy importante el uso de bucles de programación como lo son: For, If Else, Break, while entre otros.

4. Resultados

4.1. Bases de datos completas y consistentes

Como resultado se obtuvo una base de datos completa y consistente de acuerdo a pruebas estadísticas, con registros de precipitación mensual en milímetros para la provincia de García Rovira. Esta base de datos está conformada por 12 estaciones meteorológicas, seis de ellas con un periodo de tiempo de 58 años y las demás con un periodo de tiempo de 38 años.

4.2. Climatología de la precipitación

Todos los meses y en todas las estaciones se presentó alta variabilidad de la precipitación con valores del coeficiente de variación superiores al 50%, la mayoría de los datos mensuales, un 85% presentaron una distribución de probabilidad gamma. La provincia de García Rovira cuenta con acumulados de precipitación anual entre los 700 mm y los 1700 mm.

Se observa que la precipitación en la provincia de García Rovira obedece a un régimen bimodal, con mayores lluvias en los meses de abril, mayo, septiembre, octubre y noviembre. Los meses de enero, febrero, junio y diciembre son los que presentan los acumulados más bajos de precipitación. Las estaciones de portillo y Tabeta obedecen a un régimen monomodal, con acumulados bajos de precipitación solo en los meses de enero, febrero y diciembre; en los demás meses se presentan altos acumulados de precipitación y su comportamiento es uniforme.

En cuanto a la parte espacial los mayores acumulados de precipitación en los meses de enero, febrero, marzo, abril, mayo, septiembre, octubre y noviembre se presentan en la parte occidental de la provincia, y en los meses de junio y julio los mayores acumulados de precipitación se presentan en la parte oriental de la región. La parte sur presenta los menores acumulados mensuales de precipitación en milímetros todo el año; la parte central de la región presenta los valores promedios de precipitación.

4.3. Cálculo y caracterización de las sequías meteorológicas

Se obtuvieron matrices para cada estación con los valores del SPI mensual, con una escala temporal de un mes, desde el año 1978 al 2016.

El número de sequías meteorológicas ocurridas entre el año de 1979 y el 2016 oscila entre 40 y 60 sequías siendo el rango de 50 a 60 sequías en los 38 años lo más común de presentarse en la región. Lo más común de presentarse en la provincia son sequías con intensidad media entre menos uno y menos uno coma cinco lo cual equivale a sequías moderadas, aunque se han llegado a presentar intensidades de sequías máximas con valores de SPI de -6,25 en abril de 1986. En la provincia las sequías meteorológicas por lo general tienen una magnitud con un valor de SPI de -

2,03, correspondiendo a sequías poco fuerte, aunque se han llegado a tener sequías con magnitudes de hasta -31,39 en 1986 siendo una sequía extremadamente fuerte. La duración promedio de las sequías en la provincia es de dos meses, aunque en el año 1986 se presentó una sequía que llegó a durar nueve meses. En la provincia de García Rovira las sequías más frecuentes son las de tipo moderado con un 58% presentándose cada 1,1 años en promedio, seguidas de las sequías severas con una frecuencia del 30% ocurriendo cada dos años en promedio y las menos frecuentes las sequías extremas con una frecuencia de 12% y una ocurrencia cada 5,42 años en promedio. Las condiciones más adversas de la sequía se presentan en la parte oriental de la región, en la parte alta del municipio de Concepción en mayor parte.

Las sequías meteorológicas más representativas en la provincia han sido las ocurridas en los años de 1981, 1986, 1992, 1997, 2002, 2010 y 2015 siendo clasificadas como sequías extremas, siendo toda la provincia susceptible a este tipo de fenómeno.

4.4. Caracterización y correlación del fenómeno de El Niño oscilación del sur ENSO con las sequías meteorológicas

El fenómeno de El Niño tiene una frecuencia de ocurrencia entre tres y ocho años, siendo los más frecuentes cada tres años, pero estos se catalogan como eventos de El Niño débiles. Los eventos catalogados como fuertes tienen una frecuencia de ocurrencia en promedio de 6 a 7 años, los años con fenómeno de El Niño son: 1982, 1987, 1992, 1997, 2010 y el 2016. Gráficamente se observa que los fenómenos El Niño son cada vez más fuertes.

Mediante el coeficiente de correlación de Pearson se observa que los valores de SPI con los del ONI presentan correlaciones catalogadas como muy bajas. Aunque realizando una superposición gráfica se observa que los valores clasificados como extremos del SPI coinciden con los valores catalogados como fuertes del ONI.

4.5. Homogeneidad de los datos

La homogeneidad de los datos de acuerdo al test de Mann Kendall con valores de Pvalue $> 0,05$, lo cual nos indica que las estaciones de la provincia de García Rovira no están presentando cambios en el comportamiento anual de la precipitación. A excepción de la estación de Cepita la cual arrojo un valor de Pvalue = $0,002$ indicando que esta estación si está presentando cambios en el comportamiento anual de la precipitación.

4.6. Automatización de la metodología sobre sequías meteorológicas

Como producto se elaboró una librería programada en el software R Project, la cual requiere como insumo los datos de precipitación mensual de las diferentes estaciones ordenados acorde a la metodológica ya establecida, esta base de datos puede contener datos inconsistentes y faltantes, debe estar en formato "xlsx". Esta aplicación eliminara los datos atípicos y luego estimara los datos faltantes, arrojando como resultado bases de datos completas y consistentes. Luego utiliza las diferentes estadísticas para determinar la climatología de la precipitación, elaborando tablas y datos donde se resumen estos valores que corresponden a la climatología mensual de cada estación. Posteriormente realiza el cálculo de las sequia por medio del SPI y su respectiva caracterización; luego realiza la correlación con el fenómeno del niño por medio del índice ONI, además elabora los correspondientes gráficos de cada estación. Esta aplicación no alcanza a gastar un minuto de tiempo para ejecutarse en un equipo con una memoria RAM de 2 GB.

5. Análisis de Resultados

5.1. Bases de datos completas y consistentes para la provincia de García Rovira

Contar con información meteorológica completa y consistente, es el requerimiento más importante a la hora de modelar las variables meteorológicas; pero esto es difícil de encontrar, en la realidad se encuentran bases de datos que presentan registros faltantes e inconsistentes. Si se quiere contar con bases de datos optimas, se requiere la aplicación de diferentes técnicas estadísticas que deben ser acordes al comportamiento de los mismos datos. Es importante la aplicación de diferentes técnicas como es el análisis exploratorio de los datos y luego el análisis

confirmatorio para tomar decisiones importantes a la hora de realizar el llenado de datos faltantes y determinar la consistencia de los mismos (Castro y Escobar, 2010). Otro ítem fue la correlación entre las estaciones, esto es importante a la hora de llenar los datos faltantes, de esta prueba se concluye que hay estaciones como Cepita y Portillo que no se correlacionan con ninguna estación en la región, lo cual conlleva a tener en cuenta otros métodos para estimar los datos faltantes.

5.2. Variabilidad de la precipitación en la provincia de García Rovira y la presencia de sequías meteorológicas

Con los resultados obtenidos en esta investigación, de forma exploratoria, se afirma que las sequías meteorológicas aumentan su presencia en la provincia de García Rovira debido a la variabilidad que presenta la precipitación; las estaciones están presentando un aumento de ocurrencia de sequías de 13% en promedio, con excepciones en las estaciones de Capitanejo y Tabeta en las cuales el evento meteorológico ha disminuido su presencia, estos resultados concuerdan o tienen relación con lo concluido por (Gonzalo, 2012) donde se afirma que el Sur occidente de la región Andina tiene una tendencia a la disminución de lluvias y por consiguiente al aumento de ocurrencia de sequías meteorológicas.

Málaga y Macaravita son los dos municipios mayormente afectados por las sequías extremas, se aclara que en toda la región se presentan sequías extremas, la frecuencia de ocurrencia de las sequías extremas concuerda con lo establecido por (Gonzalo, 2012) donde concluyen que en la región Andina la frecuencia de ocurrencia de sequías meteorológicas oscila entre 4 y 8 años, siendo más probables en el primer semestre. Las sequías meteorológicas en la provincia tienen

una duración promedio de 1,2 meses, aunque se han llegado a presentar duraciones de 9 meses esto fue en el año de 1986 y una sequía de 7 meses en el año 1989, en la parte nor oriental de la provincia es donde tienden a tener mayor duración las sequías, disminuyendo en la dirección sur occidental. En cuanto a la intensidad lo más común de encontrar en la provincia son valores de SPI de -1,52 lo cual equivale a sequías severas, pero esto se debe a que contamos con valores de intensidades máximas de hasta SPI de -6 en el año de 1986 y de valores SPI de -4 en los años 1998 y 2013 lo cual nos eleva el promedio, por lo tanto se puede analizar que las intensidades más comunes de encontrar son las que comprenden el rango de sequías moderadas con valores de SPI entre -1 y -1,5, siendo la parte nor oriental y sur occidental donde se presentan las intensidades más severas. La magnitud más común de presentarse en la región, son eventos de sequía con acumulados de -2,03, siendo estas clasificadas como sequías poco fuertes, aunque se han llegado a tener magnitudes de -31,39 en 1986, -11,93 en 1989 y -6,03 en el 2010, lo cual equivale a sequías extremadamente fuertes; espacialmente las mayores magnitudes tienden a presentarse en la parte nor oriental de la provincia, estas disminuyen en la dirección sur occidental. De todas estas características se pueden resumir los eventos de sequía meteorológica más representativos para la provincia de García Rovira siendo estos los ocurridos en los años 1982, 1986, 1992, 1997, 2002, 2011 y el 2015 coincidiendo con los autores (Zuluaga et al., 2009; Gonzalo, 2012; Loaiza, 2018; Vega y Rodríguez, 2018) quienes realizaron estudios sobre caracterización de sequías meteorológicas en Colombia, los eventos más representativos de sequías clasificados por estos autores coinciden con los encontrados en esta investigación.

Las sequías meteorológicas más representativas para la provincia de García Rovira son las presentadas en los años 1982, 1987 1992, 1997, 2002, 2010, estas se pueden catalogar como sequías continentales debido a que coinciden con algunas sequías caracterizadas en países

latinoamericanos como México, Perú, Ecuador, Argentina llevadas a cabo en los siguientes estudios (Quispe, 2012; Rivera, 2014; Olivares et al., 2016; Arriaga et al., 2017; Valarezo, 2017). Y las sequías severas de los años 1982, 1992 y 2010 se pueden catalogar como sequías mundiales debido a que coinciden con sequías caracterizadas en México y España las cuales se denominaron que estaban afectando todos los continentes, esto se afirma en los siguientes estudios (Poquet et al., 2008; Ortega, 2012).

Los resultados de la correlación de Pearson entre los índices ONI y SPI son muy cerca nos al cero, de lo cual se deduce que el fenómeno de El Niño no tiene relación alguna con los cambios de precipitación y por consiguiente con la presencia de sequías en el área de estudio. Aunque se realizó una superposición gráfica entre el SPI y el ONI, donde se evidencia que los eventos de sequía meteorológica extremos coinciden con la presencia de los eventos más fuertes del fenómeno de El Niño; teniendo estos una frecuencia de ocurrencia de 5,42 años en promedio. De lo anterior se analiza que la variabilidad interanual de la precipitación en la provincia de García Rovira si está relacionada con la presencia del fenómeno de E l Niño el cual tienen una frecuencia de ocurrencia que varía entre 3 y 8 años, en estos periodos se presentan las sequías más severas en la región; también se analiza que la variabilidad de la precipitación anual o con periodos inferiores a tres años no tienen relación con los valores del índice ONI y por consiguiente no tiene relación con la presencia de sequías meteorológicas moderadas y severas. Estos resultados y análisis coinciden con lo afirmado por los autores (Zuluaga et al., 2009) (Bocanegra y Pabón, 2000; Gonzalo, 2012; Díaz et al., 2014; Loaiza, 2018; Vega y Rodríguez, 2018) los cuales concluyen que las correlaciones entre el SPI y el ONI son bajas en todo el territorio colombiano, pero la presencia de sequías extremas en Colombia si está relacionada con la presencia del fenómeno del niño. Autores como (Carvajal et al., 1998; Ramírez y Jaramillo,

2009; Gonzalo, 2012; Arango et al., 2014; Osorio, 2018; Trujillo, 2018) también concluyen que las sequías extremas en Colombia están relacionadas con la presencia del fenómeno de El Niño, en lo que no coincide con los resultados de esta investigación, es que estos autores obtienen buenas correlaciones entre el SPI y el ONI para la región Andina con valores de $R^2 = 0$; 4. Autores como (Torres y Granados, 2018) (León et al., 2017) coinciden en este estudio encontrando como las principales sequías en Colombia las ocurridas en los años 1992, 1997, 1998, 2010, 2015, 2016 para las cuales ya se tienen estimadas las pérdidas económicas siendo estas considerables. Por ejemplo, la sequía de 1997 a 1998 generó pérdidas por valor de 575 millones de dólares según el (Comité Técnico Interagencial del Foro de Ministros del Medio Ambiente de América Latina y el Caribe, 2000); estas sequías han sido ocasionadas por la presencia del fenómeno de El Niño y han provocado crisis energética en el país.

Según los hallazgos de esta tesis se afirma que mediante análisis estadístico descriptivo, de dispersión y gráfico tanto temporal como espacial, se correlaciona la variabilidad anual o interestacional de la precipitación en la provincia de García Rovira al ciclo de la Zona de Convergencia Intertropical (ZCIT), la cual ocasiona la bimodalidad de la lluvia en la región, para lo cual, se tienen mayores lluvias en los meses de Abril, Mayo, Septiembre, Octubre y Noviembre, los demás meses presentan precipitaciones menores; se recalca que dos estaciones Portillo y Tabeta presentan unimodalidad; de acuerdo al coeficiente de correlación de Pearson, el cual dice que estas estaciones no se correlacionan con las demás, lo cual, es un indicativo para atribuirle el comportamiento único de estas estaciones a características propias del lugar por estar ubicadas en la zona de páramo con cotas de 3824 y 3168 m.s.n.m respectivamente, donde se presentan microclimas especiales. Estos resultados son homólogos a los resultados obtenidos por (Mejía et al., 1999; Ramírez y Jaramillo, 2009), quienes afirman que la ZCIT pasa dos veces por

el territorio colombiano en abril, mayo hacia el norte y en octubre y noviembre hacia el sur, causando aumentos de precipitación a su paso, además la ZCIT es la principal causante de la bimodalidad en Colombia y en especial en la región Andina. Esta variabilidad anual e interestacional se correlaciona con la presencia de sequías moderadas y algunas de las sequías fuertes las cuales tienen una frecuencia de ocurrencia entre ocho meses y dos años. Este análisis concuerda con los resultados dados por (Bocanegra y Pabón, 2000), quien concluye que la coincidencia entre el Atlántico norte cálido y el Atlántico sur frío ocasiona un reforzamiento sobre la ZCIT, esto hace que la parte norte del continente Suramericano presente sequías más intensas. Los registros de precipitación más altos en la provincia de García Rovira tienen movimientos espaciales que van del nor oriente con mayores lluvias en los meses de junio, julio al sur occidente con mayores lluvias en los demás meses.

Adicionalmente la presencia de sequías en la provincia de García Rovira en especial las de tipo moderado y fuerte pueden estar siendo ocasionadas por otros factores geográficos como los son la cordillera de los Andes, la interacción del Atlántico, los vientos alisos y las condiciones especiales que puede aportar el cañón del Chicamocha al área de estudio. Otra afirmación de acuerdo al test de Mann Kendall y un nivel de significancia del 0,05, con valores de Pvalue > 0:05 en todas las estaciones, es que la variable precipitación no está presentando cambios en el comportamiento de los acumulados anuales de precipitación que pueda ser atribuido a fallas en el aparato de medición, cambios en el territorio (en especial de infraestructura) que puedan cambiar la lectura en el pluviómetro, o la hipótesis más importante que se esté manifestando un posible cambio climático con respecto a la variable precipitación en la provincia. Este análisis concuerda con lo concluido por (Ruiz and González, 2017) quien tampoco encontró cambios significativos en los valores medios anuales de la precipitación en la isla de la vieja providencia Colombia.

Pero este análisis no concuerda por lo concluido por (Puertas et al., 2011) quien, si encontró cambios significativos hacia la reducción de los promedios de precipitación anual en la parte media-alta de la cuenca del río Cauca Colombia, estos análisis fueron también realizados con el test de Mann Kendall. Este análisis tampoco concuerda con lo analizado por (Carvajal et al., 1998; Vide, 2008; Díaz et al., 2014) quienes afirman que los eventos extremos como las sequías están siendo inducidos por la alta variabilidad climática atribuida al cambio climático considerado como inequívoco, inusual y de origen antropogénico, siendo sus posibles efectos alarmantes.

5.3. Automatización de la metodología sobre caracterización de sequías meteorológicas

El avance de la tecnología y de los recursos informáticos, ha permitido la manipulación más eficiente y rápida de los datos, logrando automatizar metodologías como es el caso de este estudio, en el cual se tiene automatizada la metodología para la caracterización de sequías meteorológicas en la provincia de García Rovira. De lo cual se puede analizar como ventajas el hecho de que se pueden corroborar los resultados y se pueden realizar cambios de datos a última hora debido a la agilidad que esto representa, con lo cual se pueden obtener los resultados del proyecto completo en menos de 1 minuto en un equipo con una memoria RAM de 2 GB.

6. Recomendaciones

Se recomienda realizar la estimación de datos faltantes con metodologías más robustas como lo son los métodos geo estadísticos como la construcción de isoyetas o el análisis bayesiano.

Se recomienda hacer el análisis de aumento de las sequías meteorológicas mediante una prueba confirmatoria como lo es el análisis de rachas.

Se recomienda realizar una correlación entre los índices ONI y SPI solo con los valores donde hay presencia del fenómeno del niño.

Se recomienda monitorear el clima debido a que se presentan cambios en el mismo, para lo cual, se manifiestan fenómenos meteorológicos más extremos atribuidos al cambio climático en especial; para lo cual se contribuye con una aplicación programada en el software R project 3.5 la cual facilita dicho monitoreo.

7. Trabajos Futuros

Realizar la comparación de diferentes métodos que nos permitan estimar los datos faltantes para las estaciones de la provincia de García Rovira. Y analizar si hay cambios considerables y que tan sensibles son los resultados de las características sobre las sequías meteorológicas a estos cambios.

Obtener datos sobre otras variables climáticas como la temperatura y la evapotranspiración con el fin de aplicar un índice de sequía más robusto para realizar la caracterización espacio temporal de los diferentes tipos de sequía.

Realizar la caracterización espacio temporal de los diferentes tipos de sequía.

8. Conclusiones

De acuerdo a las estadísticas descriptivas de las características de las sequías meteorológicas en la provincia de García Rovira se concluye que las mismas están presentando un aumento de ocurrencia, atribuido a la alta variabilidad de la precipitación en la región, siendo más comunes las de tipo moderado con una frecuencia de ocurrencia de 8 meses en promedio.

Mediante un análisis gráfico y de correlación se concluye que la variabilidad interanual de la precipitación está relacionada con la presencia del fenómeno de El Niño, y que esta es la causa principal de la presencia de sequías meteorológicas extremas en la provincia.

Como conclusión se tienen que el índice estandarizado de precipitación (SPI) es un índice apropiado para caracterizar la sequía meteorológica en la provincia de García Rovira, debido a que los resultados de sequías meteorológicas en esta investigación son coherentes con los episodios ocurridos a nivel nacional, continental y mundial.

Según un análisis estadístico descriptivo y gráfico se concluye que la variabilidad anual e interestacional de la precipitación en la región se le atribuye a la interacción de la Zona de Convergencia Intertropical (ZCIT), y por consiguiente es la principal causa de la presencia de sequías meteorológicas catalogadas como moderadas y fuertes en la provincia de García Rovira.

Según el análisis estadístico descriptivo, de dispersión, exploratorio se concluye que la precipitación en la provincia de García Rovira presenta un comportamiento bimodal con mayores lluvias en los meses de abril, mayo, septiembre, octubre y noviembre, siendo su principal causa la interacción del territorio con la ZCIT. Adicionando que la precipitación presenta alta variabilidad de acuerdo al coeficiente de Variabilidad, lo cual en la mayoría de los casos fue superiores al 50%.

Mediante el test de Mann Kendall con un nivel de confianza del 95% y un margen de error del 5% se concluye que la variable precipitación en la provincia de García Rovira no está

presentando cambios en el valor promedio anual de la lluvia, que pueda ser atribuido a un existente cambio climático.

Referencias Bibliográficas

- Agosta, E. (2004). Variaciones del clima terrestre y rayos cósmicos galácticos durante el ciclo solar de 11 años revisión teórica. Revista Meteorológica, 29 (1-2), 47–62. Recuperado de <http://www.divulgameteo.es/uploads/Clima-rayos-c%C3%B3smicos.pdf>
- Albentosa, L. (2015). La aplicación del método estadístico en climatología. el régimen anual de precipitaciones. Barcelona, España: CORE. Recuperado de <https://core.ac.uk/download/pdf/39036308.pdf>
- Alcántara, L., Aguiar, I., Oliveira, V., Neto, S., Coutinho, A., y Antonino, A. (2019). Análise de tendência para dados pluviométricos no município de Toritama PE. Journal of

- Environmental Analysis and Progress, 4 (2), 130–139. Recuperado de <http://www.ead.codai.ufrpe.br/index.php/JEAP/article/view/2377>
- Alencar, K., y Silva, R. (2017). Tendencia pluviométrica y concentración estacional de precipitación en la cuenca hidrográfica del río Moxotó Pernambuco Brasil. Revista Geográfica de América Central, 1 (58), 295–313. doi: [10.15359/rgac.58-1.12](https://doi.org/10.15359/rgac.58-1.12)
- Arango, C., Dorado, J., Guzmán, D., y Ruíz, J. (2014). Variabilidad climática de la precipitación en Colombia asociada al ciclo el niño la niña oscilación del Sur ENSO. Colombia: IDEAM. Recuperado de <http://institucional.ideam.gov.co/jsp/2456>
- Arriaga, G., Hurtado, P., Agustín, M., Valle, V., Cohen, I., y García, V. (2017). Análisis de sequías mediante el índice estandarizado de precipitación SPI en dos cuencas de la sierra madre occidental. Revista Agrofaz, 17 (2), 97-110. Recuperado de <https://dialnet.unirioja.es/servlet/articulo?codigo=6512478>
- Ashot, K., y Vijay, P. (2010). A review of drought concepts. Journal of Hydrology, 391 (1-2), 202-216. Recuperado de <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0022169410004257>
- Barrero, A., (2005). Análisis de la sequía histórica de 1925 1926. Revista Meteorología Colombiana, V. 9, 87–92. Recuperado de <https://scholar.google.com/scholar?oi=bibs&cluster=2357051357291863028&btnI=1&hl=es>
- Barros, V., Menéndez, Á., y Nagy, G. (2005). El cambio climático en el río de la Plata. Buenos Aires, Argentina: CIMA. Recuperado de http://www.cima.fcen.uba.ar/~lcr/libros/Cambio_Climatico-Texto.pdf
- Bocanegra, M., Edgar, J., y Caicedo, J. (2000). La variabilidad climática interanual asociada al ciclo El Niño-La Niña-oscilación del Sur y su efecto en el patrón pluviométrico de Colombia. Revista Meteorología Colombiana, V. 2, 7-21. Recuperado de https://www.researchgate.net/profile/Jose-Daniel-Pabon-Caicedo/publication/281605886_La_variabilidad_climatica_interanual_asociada_al_ciclo_El_Nino-La_Nina_Oscilacion_del_Sur_y_su_efecto_en_el_patron_pluviometrico_de_Colombia/links/597259a60f7e9b4016943e8e/La-variabilidad-climatica-interanual-asociada-al-ciclo-El-Nino-La-Nina-Oscilacion-del-Sur-y-su-efecto-en-el-patron-pluviometrico-de-Colombia.pdf
- Campos, B. (2016). Análisis temporal de la sequía meteorológica en localidades semiáridas de Venezuela. Revista UGCIencia, 22 (1), 11–24. Recuperado <http://contexto.ugca.edu.co/index.php/ugciencia/article/view/481>
- Carvajal, Y., Jiménez, H., y Materón, H. (1998). Incidencia del fenómeno ENSO en la hidroclimatología del valle del río Cauca Colombia. Revista Bulletin de l’Institut français d’études andines, 27 (3), 537-546. Recuperado <https://www.redalyc.org/pdf/126/12627318.pdf>

- Castro, L., y Escobar, Y. (2010). Análisis de tendencia y homogeneidad de series climatológicas. *Revista Ingeniería de Recursos Naturales y del ambiente*, N (9), 15–25. Recuperado de <https://www.redalyc.org/pdf/2311/231116434002.pdf>
- Costa, V., Ferreira, M., y Cordeiro, M. (2015). Análise de séries temporais climáticas. *Revista de Ciências Agroveterinárias*, 14 (2), 169–177. Recuperado de <http://200.19.105.203/index.php/agroveterinaria/article/view/5579>
- Crespo, G. (2004). Comparación de dos metodologías para el cálculo del índice de severidad de sequía para doce reservas de la biosfera mexicana. México: MABUNESCO. Recuperado de https://docplayer.es/28503115-Comparacion-de-dos-metodologias-para-el-calculo-del-indice-de-severidad-de-sequia-para-doce-reservas-de-la-biosfera-mexicana.html#tab_1_1_2
- Dai, A. (2011). Drought under global warming a review. *Journal Wiley Interdisciplinary Reviews Climate Change*, 2 (1), 45–65. Recuperado de http://denning.atmos.colostate.edu/readings/Impacts/WIREs_Clim_Change_2010_Dai.pdf
- Departamento de la República de la Función Pública. (2012). Decreto 1323 de 2012. Bogotá, Colombia: EVA. Recuperado de https://www.funcionpublica.gov.co/eva/gestornormativo/norma_pdf.php?i=47967
- Departamento Administrativo de la Presidencia de la República. (2013). Decreto 1974 de 2013. Bogotá, Colombia: Presidencia de la República. Recuperado de <http://wp.presidencia.gov.co/sitios/normativa/leyes/Documents/Juridica/DECRETO%201974%20DE%202013.pdf>
- Díaz, Á., Escobar, Y., y Serna, S. (2014). Análisis de la influencia de El Niño y La Niña en la oferta hídrica mensual de la cuenca del río Cali. *Revista Tecnura*, 18 (41), 120–133. Recuperado de <https://www.redalyc.org/pdf/2570/257031319010.pdf>
- Dinero. (2014). Alerta por sequias en Colombia. Bogotá, Colombia: Dinero. Recuperado de <https://www.dinero.com/pais/articulo/consecuencias-impacto-sequias-colombia-2014/198838>
- Escobar, G., y De, J. (2011). Calentamiento global en Colombia. Bogotá, Colombia: ND. Recuperado de <https://core.ac.uk/download/pdf/11053804.pdf>
- Hurtado, G. (2012). Sequia meteorológica y sequia agrícola en Colombia incidencia y tendencias. Colombia: IDEAM. Recuperado de <http://www.ideam.gov.co/documents/21021/21138/Sequias+Incidencias+y+Tendencias.pdf/3e72c86c-cf4a-42f9-95f1-07e7cf88861a>
- Guenni, L., Degryze, E., y Alvarado, K. (2008). Análisis de la tendencia y la estacionalidad de la precipitación mensual en Venezuela. *Revista Colombiana de Estadística*, 31 (1), 41–65.

- Recuperado de <http://emis.ams.org/journals/RCE/body/v31n1a03GuenniDegryzeAlvarado.pdf>
- Instituto de Hidrología Meteorología y Estudios Ambientales. (2015). Ley 164 de 1994. Bogotá, Colombia: IDEAM. Recuperado de http://www.ideam.gov.co/documents/24024/26915/C_Users_JGomez_Documents_LEY+164+DE+1994.pdf/85833e1c-6ceb-4554-bce5-21e433329019
- Lamb, P., y Changnon, S. (1981). En las mejores temperaturas normales y precipitaciones: la situación de Illinois. *Journal of Applied Meteorology*, 20 (12), 1383–1390. Recuperado de [https://journals.ametsoc.org/doi/abs/10.1175/1520-0450\(1981\)020%3C1383%3AOTTAPN%3E2.0.CO%3B2](https://journals.ametsoc.org/doi/abs/10.1175/1520-0450(1981)020%3C1383%3AOTTAPN%3E2.0.CO%3B2)
- León, S., Salcedo, L., Otalora, G., Álvarez, A., Giraldo, C., y Díaz, S. (2017). Efectos económicos de futuras sequías en Colombia estimación a partir del fenómeno el niño 2015. Colombia: DNP. Recuperado de <https://colaboracion.dnp.gov.co/CDT/Estudios%20Econmicos/466.pdf>
- Lettenmaier, D. (2003). The role of climate in water resources planning and management. *Water Science Policy and Management Challenges and Opportunities*. doi: [10.1029/016WM15](https://doi.org/10.1029/016WM15)
- Loaiza, W. (2018). Evaluación de sequías meteorológicas y procesos de adaptación de las comunidades agrícolas de la cuenca del Río Dagua Valle del Cauca. Cauca, Colombia: IREHISA. Recuperado de <http://bibliotecadigital.univalle.edu.co/handle/10893/8003>
- Maya, F., y Siscart, D. (1995). Los efectos demográficos de la sequía en población de encina. *Revista Cuadernos de la Sociedad Española de Ciencias Forestales*, N. (2), 77–81. Recuperado de <https://dialnet.unirioja.es/descarga/articulo/4247512.pdf>
- Medina, G., Ruíz, J., Maciel, L., Serrano, V., y Silva, M. (2006). Estadísticas climatológicas básicas del estado de Aguascalientes período 1961- 2003. México: INIFAP. Recuperado de <http://biblioteca.inifap.gob.mx:8080/xmlui/bitstream/handle/123456789/3406/Estadisticas%20climatologicas%20basicas%20para%20el%20estado%20de%20Baja%20California.pdf?sequence=1>
- Mejía, F., Mesa, O., Poveda, G., Vélez, J., Hoyos, C., Mantilla, R., Barco, J., y Cuartas, A. (1999). Distribución espacial y ciclos anual y semianual de la precipitación en Colombia. *Revista Dyna*, V. 127, 7-15. Recuperado de http://www.academia.edu/download/4954655/hoyos1999_precipitacioncolombia_dyna.pdf
- Méndez, J., Návar, J., y González, V. (2008). Análisis de tendencias de precipitación 1920 2004 en México. *Revista de Investigaciones Geográficas*, 900 (65), 38–55. Recuperado de http://www.scielo.org.mx/scielo.php?pid=S0188-46112008000100004&script=sci_arttext

- Ministerio de Ambiente. (s.f.). Decreto 2811 de 1974. Bogotá, Colombia: MINAMBIENTE. Recuperado de http://www.minambiente.gov.co/images/GestionIntegraldelRecursoHidrico/pdf/normativa/Decreto_2811_de_1974.pdf
- Ministerio de Ambiente. (2014). Ley 461 de 1998. Bogotá, Colombia: MINAMBIENTE. Recuperado de https://www.minambiente.gov.co/images/normativa/leyes/1998/ley_0461_1998.pdf
- Ministerio de Ambiente Vivienda y Desarrollo Territorial. (2010). Política Nacional para la Gestión Integral del Recurso Hídrico. Bogotá, Colombia: MINAMBIENTE. Recuperado de https://www.minambiente.gov.co/images/GestionIntegraldelRecursoHidrico/pdf/Presencia%20Pol%C3%ADtica Nacional_Gesti%C3%B3n_libro_pol_nal_rec_hidrico.pdf
- Montealegre, J. (2014). Actualización del componente meteorológico del modelo institucional del ideam sobre el efecto climático de los fenómenos El Niño y La Niña en Colombia. Bogotá, Colombia: IDEAM. Recuperado de <http://documentacion.ideam.gov.co/openbiblio/bvirtual/021895/InformeFinalElNiNo.pdf>
- Moreno, J., Gibert, J., y Alegría, M. (s.f.). Monitores de sequías en la Cuenca del río Tijuana. México: ACADEMIA. Recuperado de http://www.academia.edu/download/47144302/ARISTAS_PAPER_Gutierrez4_mizael2.pdf
- Muñoz, R. (1995). El peligro de incendios forestales derivado de la sequía. Revista Cuadernos de la Sociedad Española de Ciencias Forestales, N. (2), 99–109. Recuperado de <https://dialnet.unirioja.es/servlet/articulo?codigo=4247532>
- Muñoz, C. (2008). Análisis de la variabilidad en series hidrometeorológicas en una cuenca de cabecera del río segura. España: Suin Juriscol. Recuperado de <http://suin.gov.co/viewDocument.asp?id=1684293>
- Olivares, B., Cortez, A., Lobo, D., Parra, R., Rey, B., Juan, C., y Rodríguez, M. (2016). Estudio de la sequía meteorológica en localidades de los llanos de Venezuela mediante el índice de precipitación estandarizado. Revista Acta Nova, 7 (3), 266–283. Recuperado de http://www.scielo.org.bo/scielo.php?pid=S1683-07892016000100004&script=sci_abstract&lng=en
- Organización Meteorológica Mundial. (2012). Índice normalizado de precipitación guía del usuario. Ginebra, Suiza: OMM. Recuperado de http://www.droughtmanagement.info/literature/WMO_standardized_precipitation_index_user_guide_es_2012.pdf

- Organización Meteorológica Mundial . (2016). Manual de indicadores e índices de sequía. Ginebra, Suiza: OMM. Recuperado de http://www.droughtmanagement.info/literature/WMO-GWP_Manual-de-indicadores_2016
- Organización Meteorológica Mundial. (27 de Noviembre de 2018). Aumenta el riesgo de un episodio inminente del fenómeno El Niño. La Vanguardia. Recuperado de <https://www.lavanguardia.com/natural/20181127/453208779088/aumenta-el-riesgo-de-un-episodio-inminente-del-fenomeno-el-nino.html>
- Ortega, D. (2012). Sequía en Nuevo León vulnerabilidad impactos y estrategias de mitigación. Recuperado de https://books.google.com/books?hl=es&lr=&id=WpAANbM6I_kC&oi=fnd&pg=PA195&dq=ortega+2012&ots=CozYF1wXCk&sig=aIiup2rKbb-lx0vmyYHI7ctU7eQ
- Panes, R., Ramírez, G., Cohen, I., Padilla, G., y Moreno, F. (2017). Validación espacial de datos climatológicos y pruebas de homogeneidad caso Veracruz México. Revista de Tecnología y Ciencias del Agua, 8 (5), 157–177. Recuperado de <http://revistatyca.org.mx/ojs/index.php/tyca/article/view/1375>
- Paredes, F., Millano, J., y Guevara, E. (2008). Análisis espacial de las sequías meteorológicas en la región de los llanos de Venezuela durante el período 1961 1996. Revista de Climatología, 8 (1578-8768), 15-27. Recuperado de https://www.researchgate.net/profile/Franklin_Paredes/publication/26520708_Analisis_e_spatial_de_las_sequias_meteorologicas_en_la_region_de_Los_Llanos_de_Venezuela_durante_el_periodo_1961-1996/links/55e354e008aeb1a7cc9ca76/Analisis-espacial-de-las-sequias-meteorologicas-en-la-region-de-Los-Llanos-de-Venezuela-durante-el-periodo-1961-1996.pdf
- Paredes, F., Barbosa, H., Moreno, M., y Farías, A. (2018). Influencia de las sequías sobre el régimen hídrico de los ríos en Venezuela. Revista Ríos en Riesgo de Venezuela, V. 2, 171–184. Recuperado de https://www.researchgate.net/profile/Franklin_Paredes/publication/325158357_Influencia_de_las_sequias_sobre_el_regimen_hidrico_de_los_rios_en_Venezuela/links/5afb5b28458515c00b6e47b4/Influencia-de-las-sequias-sobre-el-regimen-hidrico-de-los-rios-en-Venezuela.pdf
- Paredes, F., Guevara, E., Barbosa, H., y Uzcátegui, C. (2015). Tendencia de la precipitación estacional e influencia de El Niño-oscilación austral sobre la ocurrencia de extremos pluviométricos en la cuenca del lago de Valencia Venezuela. Revista de Tecnología y Ciencias del Agua, 6 (6), 33–48. Recuperado de http://www.scielo.org.mx/scielo.php?script=sci_arttext&pid=S2007-24222015000600033
- Paredes, F. (2012). Sistema para la alerta temprana de sequías meteorológicas en Venezuela. Venezuela: RIUC . Recuperado de <http://www.riuc.bc.uc.edu.ve/handle/123456789/685>

- Pichardo, G. (2006). Comparación de dos metodologías para el cálculo del índice de severidad de sequía para doce reservas de la biosfera mexicana. México: OPC. Recuperado de https://docplayer.es/28503115-Comparacion-de-dos-metodologias-para-el-calculo-del-indice-de-severidad-de-sequia-para-doce-reservas-de-la-biosfera-mexicana.html#tab_1_1_2
- Pizarro, R., Ramírez, C., Flores, J. (2003). Análisis comparativo de cinco métodos para la estimación de precipitaciones areales anuales en períodos extremos. Revista Bosque Valdivia, 24 (3), 31–38. Recuperado de https://scielo.conicyt.cl/scielo.php?pid=S0717-92002003000300003&script=sci_arttext
- Poquet, D., Belda, F., y García, F. (2008). Regionalización de la sequía en la península Ibérica desde 1950 hasta 2007 a partir del SPI y una modelización digital terreno. Valencia, España: AEMET. Recuperado de https://repositorio.aemet.es/bitstream/20.500.11765/5301/1/1D_Poquet.pdf
- Puertas, L., Carvajal, Y., y Quintero, M. (2011). Estudio de tendencias de la precipitación mensual en la cuenca alta-media del río Cauca, Colombia. Revista Dyna, 78 (169), 112–120. Recuperado de <https://revistas.unal.edu.co/index.php/dyna/article/view/21330>
- Quispe, R. (2012). Evaluación de las sequías hidrometeoro lógicas en la microcuenca Ayaviri, Perú: UNAP. Recuperado de <http://repositorio.unap.edu.pe/handle/UNAP/5502>
- Rivera, J. (2014). Aspectos climatológicos de las sequias meteorológicas en el sur de Sudamérica análisis regional y proyecciones futuras (tesis doctoral). Universidad de Buenos Aires, Buenos Aires, Argentina. Recuperado de https://digital.bl.fcen.uba.ar/download/tesis/tesis_n5504_Rivera.pdf
- Salinas, J. (2017). Evaluación de modelos de regresión para predicción de sequías en la microcuenca del río Chulco utilizando el índice estandarizado de precipitación-evapotranspiración SPEI y predictores climáticos (tesis de pregrado). Universidad de Cuenca, Cuenca, Ecuador. Recuperado de <http://dspace.ucuenca.edu.ec/jspui/handle/123456789/27349>
- Sánchez, M. (1977). La Aplicación del método estadístico en climatología 105 años de lluvias en Barcelona 1866 1979. Barcelona, España: UB. Recuperado de <http://www.divulgameteo.es/fotos/meteoroteca/105-a%C3%B1os-lluvia-Barcelona.pdf>
- Senado de la República. (2019). Ley 99 de 1993. Bogotá, Colombia: Secretaría del Senado. Recuperado de http://www.secretariasenado.gov.co/senado/basedoc/ley_0099_1993.html
- Senado de la República. (2019). Ley 1574 de 2012. Bogotá, Colombia: Secretaría del Senado. Recuperado de http://www.secretariasenado.gov.co/senado/basedoc/ley_1574_2012.html
- Solomon, S., Qin, D., Manning, M., Averyt, K., y Marquis, M. (2007). Climate change 2007 the physical science basis working group I contribution to the fourth assessment. Canadá:

- IPCC. Recuperado de https://wg1.ipcc.ch/publications/wg1-ar4/faq/docs/AR4WG1_FAQ-Brochure_LoRes.pdf
- Torres, L. y Díaz, M. (2018). Análisis detallado de metodologías para definición de índices de sequía caso cuenca río Sumapaz. Colombia: AIIH. Recuperado de https://www.ina.gob.ar/congreso_hidraulica/resumenes/LADHI_2018_RE_31.pdf
- Trujillo, D., y Giraldo, D. (2018). Aportes a la caracterización estadística de sequías meteorológicas en el territorio colombiano. Bogotá, Colombia: AIIH. Recuperado de https://www.ina.gob.ar/congreso_hidraulica/resumenes/LADHI_2018_RE_709.pdf
- Valerazo, L. (2017). Caracterización de las sequías meteorológicas en la cuenca del Paute mediante la aplicación del índice de precipitación estandarizado en diversas escalas temporales (tesis de pregrado). Universidad de Cuenca, Cuenca, Ecuador. Recuperado de <http://dspace.ucuenca.edu.ec/jspui/handle/123456789/28727>
- Valiente, O. (2001). Sequía definiciones tipologías y métodos de cuantificación. Revista de Investigaciones Geográficas, N. (26), 59–80. Recuperado de <https://dialnet.unirioja.es/servlet/articulo?codigo=111741>
- Vega, F. (2018). Variabilidad espaciotemporal de las sequías en el Perú y el peligro asociado al fenómeno de El Niño (tesis de maestría). Universidad Nacional Agraria la Molina, Lima, Perú. Recuperado de <http://repositorio.lamolina.edu.pe/handle/UNALM/3798>
- Vega, C. y Rodríguez, E. (2018). Macro cuenca Magdalena Cauca Colombia. Colombia: AIIH. Recuperado de https://www.ina.gob.ar/congreso_hidraulica/resumenes/LADHI_2018_RE_189.pdf
- Vide, J. (2008). La nueva realidad del calentamiento global. un decálogo del cambio climático. Revista Electrónica de Geografía y Ciencias Sociales, V. 12, 1-19. Recuperado de <http://www.divulgameteo.es/uploads/Dec%C3%A1logo-CC.pdf>
- Vida. (2 de junio de 2016). El Niño devastó por incendios área equivalente a tres veces Cali. El Tiempo. Recuperado de <https://www.eltiempo.com/archivo/documento/CMS-16610226>
- Zuluaga, J. (2009). Análisis de la Variabilidad espaciotemporal de la sequía en Colombia (tesis de maestría). Universidad Nacional de Colombia, Bogotá, Colombia. Recuperado de <http://www.bdigital.unal.edu.co/2275/>