

# UNIVERSIDAD DE CUENCA



## FACULTAD DE CIENCIAS QUÍMICAS ESCUELA DE INGENIERÍA AMBIENTAL

### CARACTERIZACIÓN DE LAS SEQUÍAS METEOROLÓGICAS EN LA CUENCA DEL PAUTE MEDIANTE LA APLICACIÓN DEL ÍNDICE DE PRECIPITACIÓN ESTANDARIZADO EN DIVERSAS ESCALAS TEMPORALES

TRABAJO DE TITULACIÓN PREVIO A  
LA OBTENCIÓN DEL TÍTULO DE  
INGENIERO AMBIENTAL

#### AUTORA:

LISBETH KATHERINE VALAREZO AGUILAR

C.I.: 0706331923

#### DIRECTOR:

ING. ROLANDO ENRIQUE CÉLLERI ALVEAR (PhD)

C.I.: 0602794406

CUENCA-ECUADOR

2017



## RESÚMEN

Las sequías meteorológicas son fenómenos climáticos muy complejos que consisten en un déficit significativo de precipitaciones debajo de lo normal durante un periodo de tiempo relativamente prolongado. En zonas tropicales hay pocos estudios de sequías que tomen en cuenta las características espaciales y temporales de las mismas. En este estudio se realizó la caracterización de sequías meteorológicas en la cuenca del río Paute mediante la aplicación del índice de precipitación estandarizado en diversas escalas temporales (1, 3, 6, 9, 12 y 24 meses). Parte de esta caracterización fue describir los parámetros de persistencia, duración, severidad, frecuencia, número de eventos y determinar su ocurrencia y severidad, para identificar en qué grado las sequías tenían un comportamiento regional. Se utilizaron datos mensuales de precipitaciones de 8 estaciones pluviométricas ubicadas en la cuenca del Paute. Los resultados muestran que las escalas temporales de 3 y 12 meses poseen una mayor sensibilidad a los cambios de precipitación representando los eventos de sequías a corto y largo plazo, facilitando la caracterización de sequías. Las estaciones Piscícola Chirimichay, Cuenca-Aeropuerto y Palmas-Azuay, al ubicarse en diferentes subcuencas muestran comportamientos diferentes que representan gráficamente mejor la diversidad de las distintas categorías de sequías. Los resultados muestran únicamente una sequía regional registrada en 1985, determinado como el evento más representativo del periodo de estudio.

Con la información obtenida se brindará información válida y precisa a las instituciones encargadas del manejo de recursos hídricos, aportando una herramienta que facilite las evaluaciones objetivas y cuantitativas de la gravedad de las sequías.

**Palabras clave:** Escala temporal, sequía meteorológica, regiones de montaña, Andes, Ecuador.



## **ABSTRACT**

Meteorological droughts are very complex climatic phenomena that consist of a significant deficit of below-normal rainfall over a relatively long period of time. Droughts in tropical regions have received little attention and there are few studies that take into account its spatial and temporal characteristics. In this study, the characterization of meteorological droughts in the Paute river basin was performed through the application of the standardized precipitation index at various time scales (1, 3, 6, 9, 12 and 24 months). Part of this characterization included the calculation of the following parameters: persistence, duration, severity, frequency, number of events, their occurrence and severity, as to identify to what degree droughts had a regional behavior. Monthly rainfall data were used from 8 rainfall stations located in the Paute basin in the period 1980-2010. The results show that the 3 and 12 month time scales have a greater sensitivity to the frequency changes that represent short and long term drought events, facilitating the characterization of droughts. The stations Piscícola Chirimichay, Cuenca-Aeropuerto and Palmas-Azuay, when located in different sub-basins, show different behaviors that better represent the diversity of the different drought categories. The results were only a regional drought registered in 1985, determined as the most representative event of the study period.

With the information obtained valid and precise information will be provided to the institutions in charge of the management of water resources, providing a tool that facilitates the objective and quantitative evaluations of the severity of droughts.

**Keywords:** time scale, meteorological drought, mountain regions, Andes, Ecuador.



## CONTENIDO

1.	INTRODUCCIÓN .....	12
1.1	Antecedentes .....	12
1.2	Justificación .....	13
1.3	Objetivos .....	13
1.4	Marco Teórico .....	14
2.	MATERIALES Y MÉTODOS .....	18
2.1	Descripción del área de estudio.....	18
2.1.1	Variabilidad espacio-temporal de la precipitación.....	19
2.2	Datos de precipitación .....	22
2.3	Metodología.....	23
2.3.1	Índice de precipitación estandarizado (IPE).....	23
2.3.2	Categorización de la intensidad del IPE .....	27
2.3.3	Caracterización de las sequías meteorológicas .....	28
	Duración.....	28
	Eventos .....	28
	Frecuencia.....	29
	Severidad.....	29
	Persistencia.....	30
2.3.4	Comparación de la ocurrencia y severidad.....	30
2.3.5	Identificación de sequías regionales .....	30
3.	RESULTADOS Y DISCUSIONES .....	31
3.1	Índice de Precipitación Estandarizado (IPE).....	31
3.1.1	IPE 3.....	31
3.1.2	IPE 12.....	33
3.2	Caracterización de las sequías meteorológicas .....	35
3.2.1	Duración.....	35
3.2.2	Eventos .....	39
3.2.3	Frecuencia.....	39
	Frecuencia relativa (%) de sequías moderadas (IPE3 - IPE12) .....	39
	Frecuencia relativa (%) de sequías severas (IPE3 – IPE12) .....	40



Frecuencia relativa (%) de sequías extremas (IPE3 – IPE12).....	40
3.2.4 Severidad.....	41
3.2.5 Persistencia.....	43
3.3 Comparación de la ocurrencia y severidad.....	44
3.4 Identificación de sequías regionales.....	46
4. CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES.....	53
Recomendaciones.....	55
5. REFERENCIAS.....	56
6. ANEXOS.....	62
Anexo A: Script implementado en R. ....	62
Anexo B: Gráficos del Índice de Precipitación Estandarizado (IPE) en las escalas temporales de 1, 6, 9 y 24 meses.....	63
Anexo C: Frecuencias relativas en las escalas temporales de 1, 3, 6, 9, 12 y 24 meses en las estaciones de estudio.....	70
Anexo D: Tablas de las frecuencias absolutas y relativas (meses) en la escala trimestral y anual. ....	73
Anexo E: Matrices de correlación de las 8 estaciones pluviométricas en las escalas temporales de 1, 6, 9 y 24 meses.....	74
Anexo F: P-Valor de las correlaciones en la escala temporal de 3 meses.....	76
Anexo G: Curvas de probabilidades empíricas de todas las estaciones de estudio en la escala trimestral y anual. ....	77



## ÍNDICE DE FIGURAS

<b>Figura 1</b> Ubicación de las estaciones pluviométricas utilizadas en la cuenca del río Paute .....	18
<b>Figura 2</b> Regímenes de precipitación de la cuenca del río Paute. ....	20
<b>Figura 3</b> Ejemplos de regímenes de lluvia: a) Bimodal 1, b) Bimodal 2, c) Unimodal 2 en las estaciones de Cuenca-Aeropuerto, Sigsig-Inecel y Palmas Azuay respectivamente.....	21
<b>Figura 4</b> Esquema de un evento de sequía.....	28
<b>Figura 5</b> Comparación de los valores de los índices de precipitación estandarizado en la escala temporal de tres meses (IPE 3), para las estaciones de Piscícola Chirimichay, Cuenca-Aeropuerto y Palmas-Azuay. ....	33
<b>Figura 6</b> Comparación de los valores de los índices de precipitación estandarizado en la escala temporal de 12 meses (IPE12), para las estaciones de Piscícola Chirimichay, Cuenca-Aeropuerto y Palmas-Azuay. ....	35
<b>Figura 7</b> Frecuencia relativa (%) de sequías en la escala trimestral. ....	41
<b>Figura 8</b> Frecuencia relativa (%) de sequías en la escala anual. ....	41
<b>Figura 9</b> Probabilidad de ocurrencia en la escala temporal de 3 meses. ....	45
<b>Figura 10</b> Probabilidad de ocurrencia en la escala temporal de 12 meses. ....	46
<b>Figura 11</b> Estaciones pluviométricas en la escala temporal de 3 meses con sus eventos de sequía en el periodo 1980-2010. ....	50
<b>Figura 12</b> Estaciones pluviométricas en la escala temporal de 12 meses con sus eventos de sequía en el periodo 1980-2010. ....	52



## ÍNDICE DE TABLAS

<b>Tabla 1</b> Ubicación y elevación de las estaciones pluviométricas.....	19
<b>Tabla 2</b> Precipitaciones de los diferentes regímenes de lluvia. ....	20
<b>Tabla 3</b> Regímenes de precipitación de las estaciones de estudio. ....	21
<b>Tabla 4</b> Valores del índice de precipitación estandarizado (IPE).....	27
<b>Tabla 5</b> Probabilidad de ocurrencia .....	29
<b>Tabla 6</b> Interpretación del coeficiente de correlación.....	30
<b>Tabla 7</b> Resultados del número de eventos, duración total y probabilidad de ocurrencia en la escala trimestral (IPE3) de las estaciones Cuenca-Aeropuerto, Palmas-Azuay y Piscícola Chirimichay .....	37
<b>Tabla 8</b> Resultados del número de eventos, duración total y probabilidad de ocurrencia en la escala anual (IPE12) de las estaciones Cuenca-Aeropuerto, Palmas-Azuay y Piscícola Chirimichay. ....	38
<b>Tabla 9</b> Resultados del número de meses (frecuencia) y periodo de retorno en la escala trimestral .....	42
<b>Tabla 10</b> Resultados del número de meses (frecuencia) y periodo de retorno en la escala anual .....	42
<b>Tabla 11</b> Matriz de correlación en la escala temporal de 3 meses. ....	47
<b>Tabla 12</b> Matriz de correlación en la escala temporal de 12 meses. ....	47



## Cláusula de licencia y autorización para publicación en el Repositorio Institucional

---

Lisbeth Katherine Valarezo Aguilar en calidad de autora y titular de los derechos morales y patrimoniales del trabajo de titulación "CARACTERIZACIÓN DE LAS SEQUÍAS METEOROLÓGICAS EN LA CUENCA DEL PAUTE MEDIANTE LA APLICACIÓN DEL ÍNDICE DE PRECIPITACIÓN ESTANDARIZADO EN DIVERSAS ESCALAS TEMPORALES", de conformidad con el Art. 114 del CÓDIGO ORGÁNICO DE LA ECONOMÍA SOCIAL DE LOS CONOCIMIENTOS, CREATIVIDAD E INNOVACIÓN reconozco a favor de la Universidad de Cuenca una licencia gratuita, intransferible y no exclusiva para el uso no comercial de la obra, con fines estrictamente académicos.

Asimismo, autorizo a la Universidad de Cuenca para que realice la publicación de este trabajo de titulación en el repositorio institucional, de conformidad a lo dispuesto en el Art. 144 de la Ley Orgánica de Educación Superior.

Cuenca, 09 de Noviembre de 2017

---

Lisbeth Katherine Valarezo Aguilar

C.I: 0706331923





## Cláusula de Propiedad Intelectual

---

Lisbeth Katherine Valarezo Aguilar autora del trabajo de titulación “**CARACTERIZACIÓN DE LAS SEQUÍAS METEOROLÓGICAS EN LA CUENCA DEL PAUTE MEDIANTE LA APLICACIÓN DEL ÍNDICE DE PRECIPITACIÓN ESTANDARIZADO EN DIVERSAS ESCALAS TEMPORALES**”, certifico que todas las ideas, opiniones y contenidos expuestos en la presente investigación son de exclusiva responsabilidad de su autora.

Cuenca, 09 de Noviembre de 2017

Lisbeth Katherine Valarezo Aguilar

C.I: 0706331923



## **DEDICATORIA**

A mis padres por la abnegación durante toda su vida para darnos lo mejor a mis hermanos y a mí. Por mostrarme la mayor de las confianzas y darme la motivación día tras día para continuar a pesar de las dificultades y distancia que nos separan.

A mi papa Angel Bolivar por brindarme todo lo necesario para poder cumplir esta meta, por luchar contra varias adversidades y demostrarme que la superación propia nos enriquece tanto profesional como personalmente. Por ser el mejor hombre que me ha inspirado para nunca dejarme vencer antes los obstáculos de la vida y por enseñarme que sin sacrificio no hay victoria. A mi madre Nelly por ser la madre estricta y amorosa que me inculcaba valores de bien motivándome cada día a luchar por mis metas, y mostrando la mayor paciencia y amor que solo los padres pueden brindar a sus hijos.

A mi hermana Viviana por ser más que una hermana mí mejor amiga, la persona que me brindaba siempre un consejo y a la vez impulsándome a continuar siempre en busca de mis sueños. A mi hermano Jinsop por estar ahí cuando lo necesitaba y por a pesar de las diferencias siempre sacarme una sonrisa y hacerme sentir su cariño de manera especial.

A mis sobrinos Dereck, Jostin, Stephano y Ariany por ser el regalo más bello que Dios y la vida pudo darme, por ser mi motivación e inspiración diaria y para en un futuro ser un ejemplo a seguir.



## **AGRADECIMIENTO**

Agradezco principalmente a Dios por guiarme durante toda mi vida para cumplir una de las muchas metas que me he propuesto, sobre todo por brindarme salud y una hermosa familia que me ha apoyado incondicionalmente.

De manera especial a mi director el Ing. Rolando Céleri Alvear, PhD por compartir a lo largo de esta investigación sus experiencias, y sobre todo por sus enriquecedores conocimientos los cuales han sido de gran importancia como guía en el desarrollo de este trabajo y al Ing. Mario Córdova por prestarme su ayuda y paciencia en ciertas inquietudes, para las cuales siempre estuvo dispuesto a compartir sus conocimientos.

A mis padres Angel y Nelly los cuales han sido el pilar fundamental en esta etapa, los mismos que me han brindado absoluta confianza y apoyo para que siga cosechando éxitos en mi vida. A mis hermanos Viviana y Jinsop por ser comprensivos y amorosos, pero sobre todo a mi hermana la cual ha estado día tras día dedicándome su tiempo, consejos y apoyo para luchar hasta el final y motivarme cada día a mejorar como ser humano.

A las personas que conocí durante el transcurso de mi carrera universitaria, los cuales considero mis mejores amigos como Luis Salinas y mi amiga de toda la vida Tatiana Loaiza, los mismos que han estado conmigo apoyándome en todo momento y demostrándome que la verdadera amistad se basa en apoyar siempre a las demás personas en los buenos y malos momentos.



## 1. INTRODUCCIÓN

### 1.1 Antecedentes

La cuenca del río Paute forma parte de los Andes Tropicales y ha adquirido una importancia esencial, debido a que abastece al Sistema Hidroeléctrico Paute Integral, ayudando a generar una gran parte de la energía eléctrica que necesita el país (Donoso, 2002). Los Andes Tropicales se extienden desde el norte de Colombia hasta el sur de Perú, y son de importancia estratégica para la estabilidad ambiental de América del Sur (Kanamaru, Hiepe, & Ramasamy, 2013). Se considera un punto crítico de biodiversidad a escala global que alberga una extraordinaria riqueza de especies y altísimos niveles de endemismo, los cuales son fundamentados por la diferenciación geológica y climática. Esta región muestra un decreciente gradiente de humedad que va de Norte a Sur, excepto Venezuela la cual se encuentra expuesta a vientos convergentes del Atlántico y el Caribe produciendo un sistema estacional destacado que presenta características pluviestacionales de sub-húmedas a secas (Ataroff et al., 2003), además de los regímenes de lluvias que son altamente diferenciados entre sus flanco oriental y occidental, los cuales fueron provocados por el levantamiento tectónico (Herzog, Martinez, Jorgensen, & Tiessen, 2012).

Los Andes tienen una importante influencia en los patrones climáticos regionales (Gregory-Wodzicki, 2000). La zona de convergencia inter-tropical (ITCZ) y la orografía andina influyen en la circulación del aire, así como el gradiente altitudinal y humedad del aire en la variabilidad de la Temperatura (Cuesta et al., 2012). Las variaciones interanuales en la precipitación pueden ser cuantiosas y obedecen principalmente al fenómeno de El Niño-Oscilación del Sur (ENOS). Este fenómeno produce una fuerte corriente del oeste en gran parte de los Andes Tropicales, inhibiendo notablemente el transporte de humedad proveniente de la cuenca del Amazonas, provocando condiciones de sequía en los Andes Tropicales, como en la región del altiplano de Bolivia y el sur de Perú, y con frecuencia en los Andes de Colombia y en el Norte de Ecuador (Vuille, 2013). En los Andes Ecuatorianos, la estacionalidad de la precipitación es bimodal, con estaciones lluviosas principales de Marzo a Mayo y de Septiembre a Noviembre. Los aumentos de la temperatura y variabilidad de la precipitación, intensidad y



frecuencia de los fenómenos climáticos puede incrementar los eventos extremos como heladas, olas de calor y frío, sequías, inundaciones, aceleración de la pérdida de humedales, afectación de las funciones de llanuras aluviales y estuarios (Cuesta et al., 2012).

## **1.2 Justificación**

Estas sequías son importantes, ya que en estos eventos la falta de disponibilidad de agua acarrea conflictos en el sector urbano, además de la afectación a la producción de alimentos (sector agrícola) y sector energético (Moneo, 2004). Una de las dificultades de estos eventos es la incapacidad de conocer con precisión las épocas de escasez de agua, que perjudica a la vez a los diferentes sectores de la población (Zhiña, 2016). Se puede apreciar la preocupación por el estudio de sequías en la cuenca del Paute, ya que estos fenómenos pueden ocasionar problemas en la agricultura, generación de energía eléctrica que podrían poner en riesgo el abastecimiento de agua potable, por lo que se ha identificado la necesidad de realizar un estudio más profundo que otros realizados anteriormente (ejemplo: Pronóstico de sequías-caso de estudio en la cuenca del río Machangara) que contemple estimar las diversas escalas temporales a nivel regional, utilizando estaciones ubicadas a lo largo de la cuenca hidrográfica.

Esto también tiene un interés científico ya que en la cuenca del río Paute se presentan varios regímenes pluviométricos altamente diferentes (por ejemplo, mientras en el mes de Julio en la zona central del Paute nos encontramos en la temporada seca, en la parte baja de la cuenca se tiene el pico de lluvia anual) y es interesante conocer el comportamiento espacial de las sequías en estas zonas climáticas.

## **1.3 Objetivos**

### **Objetivo general:**

Caracterizar las sequías meteorológicas en la cuenca del río Paute mediante la aplicación del índice de precipitación estandarizado (IPE) en diversas escalas temporales.



### **Objetivos específicos:**

- Caracterizar las sequías meteorológicas en seis (6) escalas temporales: 1, 3, 6, 9, 12 y 24 meses.
- Comparar la ocurrencia y severidad de las sequías a nivel espacial, entre las diversas estaciones ubicadas en la cuenca alta, media y baja del río Paute, con el propósito de identificar en qué grado las sequías tienen un comportamiento regional.

### **1.4 Marco Teórico**

Las sequías ocurren en diversas partes del mundo, pero existe una subjetividad sobre estas características, ya que no es lo mismo una sequía extrema en países sub-Saharianos que en los Andes Tropicales, por ejemplo. Sin embargo las sequías pueden definirse como un fenómeno natural que se refiere a un déficit significativo de precipitaciones debajo de lo normal durante un periodo de tiempo relativamente prolongado, las cuales son difíciles de determinar en el tiempo real en que empiezan y terminan (Valiente, 2001a). Estos eventos meteorológicos presentan la mayor duración y la menor predictibilidad (Campos-Aranda, 2016) y son poco caracterizadas por la dificultad que presentan al cuantificar su severidad, magnitud y extensión (Velasco et al., 2005). Wilhite y Glantz (1985) clasificaron las sequías en cuatro categorías que son: meteorológicas, agrícolas, hidrológicas y socioeconómicas (Vicario et al., 2015). Las sequías agrícolas, hidrológicas y socioeconómicas se originan con menor frecuencia que la sequía meteorológica, debido a que sus impactos se relacionan con otros parámetros además de la precipitación, como la disponibilidad y suministro de agua subterránea (Coronel, 2013). Por tanto la sequía meteorológica es la más importante, ya que las otras categorías se derivan de la misma, específicamente de la escasez de precipitaciones (Batista & R, 2016).

Palmer (1965) define la sequía meteorológica como el intervalo de tiempo, generalmente con una duración mensual o anual, durante el cual el aporte de humedad en un lugar determinado cae consistentemente por debajo de lo climatológicamente esperado o del aporte de humedad apropiado (Valiente,



2001a). Las sequías pueden ser caracterizadas a partir de índices (Vicente Serrano et al., 2012), los cuales son indicadores indirectos que se basan en información climática para cuantificar estos fenómenos y evaluar sus efectos (Ashok K. Mishra & Singh, 2010). En las últimas décadas se han desarrollado varios índices para la caracterización de las mismas (Castillo et al., 2017), sin embargo los más simples son aquellos que utilizan únicamente la precipitación y otros más complejos que emplean otros parámetros como temperatura, evapotranspiración, velocidad del viento, pérdida de humedad del suelo, entre otros (Escalante & Reyes, 2005). Los índices más reconocidos son el índice de precipitación estandarizado (IPE), índice de severidad de sequía de Palmer (PDSI), índice estandarizado de precipitación y evapotranspiración (SPEI), índice de la humedad de cultivo (CMI), índice de anomalía de precipitación (RAI), índice deciles, índice de sequía efectiva (EDI) (OMM, 2016). Uno de los índices con gran aceptación mundial en más de 70 países es el índice de precipitación estandarizado (IPE), por presentar una menor complejidad respecto a otros (Seiler et al., 2002). Hayes et al. (1999) analizaron las ventajas y desventajas de la aplicación del IPE para la caracterización de las sequías las cuales se indican a continuación.

#### Ventajas:

- Presenta una gran simplicidad al necesitar únicamente datos de precipitación y el cual puede aplicarse en las distintas estaciones del año.
- No es afectado por la topografía.
- Puede calcularse en diversas escalas de tiempo facilitando su aplicación en los diferentes campos de la meteorología, agricultura e hidrología.
- Su estandarización asegura que la frecuencia de los eventos extremos en cualquier lugar y escala de tiempo sea consistente (Núñez et al., 2015)



Desventajas:

- Depende de la calidad de datos de precipitación empleados ya que puede conducir a valores de IPE erróneos.
- La naturaleza estandarizada del índice puede llevar a una misma probabilidad de ocurrencia en cualquier lugar, limitando la identificación de regiones que sean más propensas a la ocurrencia de sequías.
- La aplicación del índice en escalas de tiempo cortas como 1, 2 o 3 meses en regiones con baja precipitación estacional puede ser susceptible a interpretaciones erróneas (Núñez et al., 2015).

El IPE es un índice meteorológico que fue desarrollado por McKee en 1993 para cuantificar el déficit de precipitación con fines de planeación o para la evaluación de sequías. Este indicador ha sido recomendado por la Organización Meteorológica Mundial (OMM) para ser utilizado en todo el mundo para la caracterización de sequías (Castillo et al., 2017). Básicamente, el IPE se calcula ajustando una distribución de probabilidades gamma a una distribución normal estandarizada (con media igual a 0 y varianza igual a 1), representando el valor resultando como el IPE (Núñez et al., 2015). A partir de este índice se podrá desarrollar herramientas que proporcionen evaluaciones objetivas y cuantitativas de la gravedad de las sequías (Vicente Serrano et al., 2012), generando una base de datos e información válida y precisa para el monitoreo constante de las condiciones del evento mediante alertas tempranas (Avilés et al., 2015), y así formular o aplicar estrategias de adaptación y mitigación que alivien tanto a corto como a mediano plazo los impactos relacionados a estas amenazas (Vuille, 2013). Recientemente se han realizado estudios principalmente en Perú, y Colombia, los cuales han utilizado este indicador. Sin embargo, estos estudios son realizados con pocas estaciones pluviométricas y en una sola escala temporal (anual o mensual), lo cual no permite un detallado análisis de la variabilidad espacio-temporal. En la cuenca del río Paute se han realizado estudios previos, como el estudio de Zhiña D. (2016) para el pronóstico de sequías aplicado en la subcuenca del río Machangara. En el estudio se desarrolló el pronóstico de sequías mediante los modelos Autoregresivos Integrados de Media Móvil (ARIMA), aplicando los índices estandarizados de



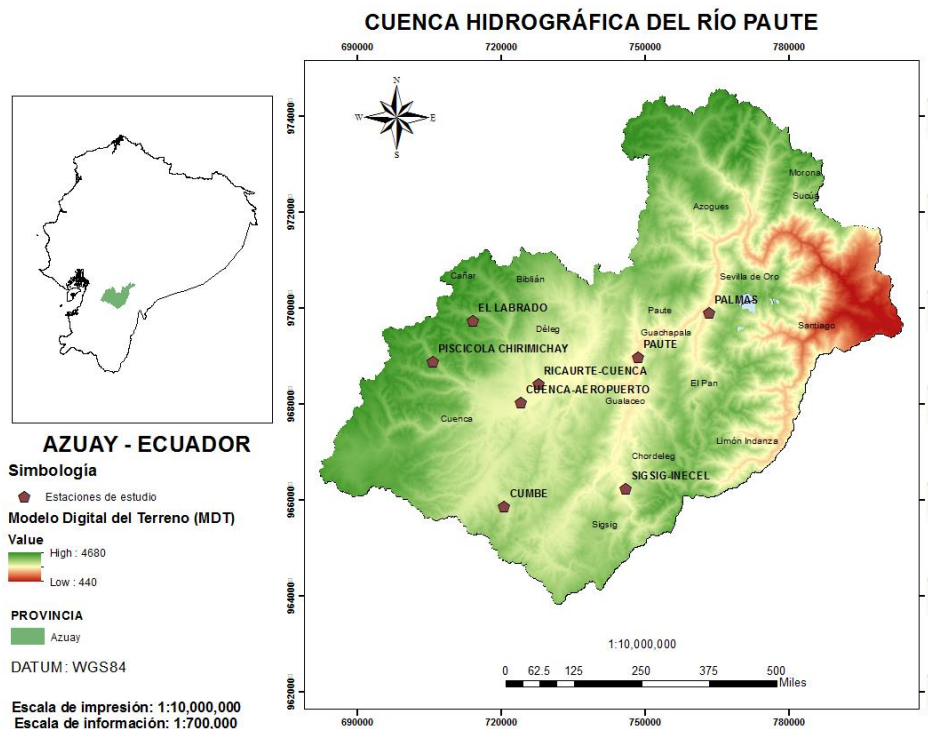


lluvia (IPE) y caudales (SSI) en la estación El Labrado en tres ventanas de tiempo. Además se puede nombrar los estudios realizados por Avilés et al., (2015) en el que se desarrolló un índice de sequía para predecir la ocurrencia y magnitud de los eventos a través de Cadenas de Markov de primer y segundo orden; y Avilés et al., (2016) en los que se comparan los modelos de Cadenas de Markov y modelos basados en redes Bayesianas para el pronóstico de sequías por medio de un índice de sequía basado en la variable de agua. Estos estudios realizan enfoques a los pronósticos y predicción de sequías, más no a su caracterización.

## 2. MATERIALES Y MÉTODOS

### 2.1 Descripción del área de estudio

El área de estudio (Figura 1) se encuentra ubicada en los Andes Centro Sur en la región austral del Ecuador, provincias de Azuay y Cañar, formando parte de la cuenca del Santiago Namangoza, la misma que constituye parte de la gran cuenca del río Amazonas (Donoso, 2002). Conforman una hoya central entre las cordilleras oriental (límite este) y occidental del sur de los Andes ecuatorianos (límite oeste), limitada al sur por el nudo Portete- Tinajillas, y al norte por el nudo del Azuay (Minga et al., 2012). La cuenca hidrográfica está conformada por 19 subcuencas que cubren un área aproximada de 6.439 km<sup>2</sup> (Cordero, 2013).



**Figura 1** Ubicación de las estaciones pluviométricas utilizadas en la cuenca del río Paute

**Fuente:** Instituto Geográfico Militar, 2004

**Realizado por:** Autor

Las subcuencas se clasifican en 3 grupos que son: cuenca alta, cuenca media y cuenca baja (Donoso, 2002), dentro de las cuales se encuentran ubicadas las estaciones pluviométricas utilizadas para el estudio. En la cuenca alta: 1 El Labrado, 2 Piscícola Chirimichay, en la cuenca media: 3 Sigsig-Inecel 4 Cuenca-Aeropuerto, 5 Ricaurte-Cuenca, 6 Cumbe, 7 Paute y en la cuenca baja: 8 Palmas.



El nombre, ubicación y elevación de estas estaciones se detallan en la Tabla 1.

**Tabla 1** Ubicación y elevación de las estaciones pluviométricas.

ESTACIONES		COORDENADAS		ALTURA
Código	Nombre	Longitud (x)	Latitud (y)	m s.n.m
M067	Cuenca-Aeropuerto	724044	9680428	2528
M418	Cumbe	720613	9658683	2722
M141	El Labrado	713978	9697404	3424
M138	Paute	748475	9689908	2162
M045	Palmas-Azuay	763294	9699159	2412
M417	Piscícola Chirimichay	705703	9688895	3503
M426	Ricaurte-Cuenca	727796	9684323	2437
M664	Sigsig-Inecel	745856	9662474	2613

DATUM WGS84

**Fuente:** INAMHI, 2013

**Realizado por:** Autor

### 2.1.1 Variabilidad espacio-temporal de la precipitación

La cuenca del río Paute es un sistema complejo y grande que presenta diferentes regímenes de precipitación. Un régimen de precipitación o también llamado régimen pluviométrico es conocido como la cantidad de precipitación, incluyendo su distribución y espacio en el tiempo y su variabilidad, conjuntamente con la frecuencia de intensidades y formas de repartirse la lluvia durante los 12 meses del año (Tullot, 2000).

La variabilidad espacial en la cuenca del río Paute, se sabe que es heterogénea y depende de dos regímenes de lluvia que son Unimodal (UM) y Bimodal (BM), lo cual podemos observar en la Figura 2. El régimen unimodal tiene un solo pico en el mes de Junio o Julio, mientras que el régimen bimodal experimenta dos picos en los meses de Abril y Octubre. La diferencia entre estos regímenes se debe a las precipitaciones medias anuales que varían notablemente en su magnitud, por lo que ambos regímenes fueron clasificados en otros como: régimen unimodal 1 y 2 (UM1-UM2), y régimen bimodal 1 y 2 (BM1-BM2). Las diferencias de precipitaciones medias anuales para la clasificación de cada régimen de lluvia se detallan a continuación en la Tabla 2:

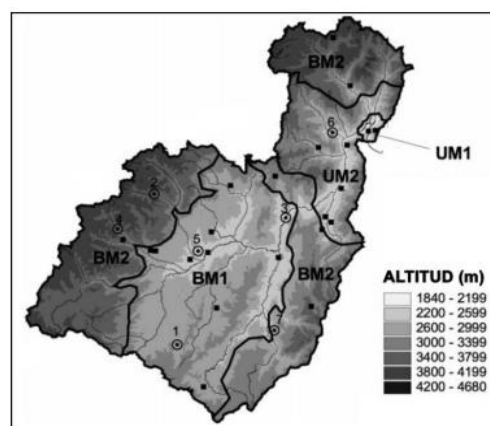
**Tabla 2** Precipitaciones de los diferentes regímenes de lluvia.

Régimen	Precipitación media anual (mm)
UM1	2900-3400
UM2	1100-1600
BM1	660-1100
BM2	1000-1800

**Fuente:** Célleri et al., (2007)

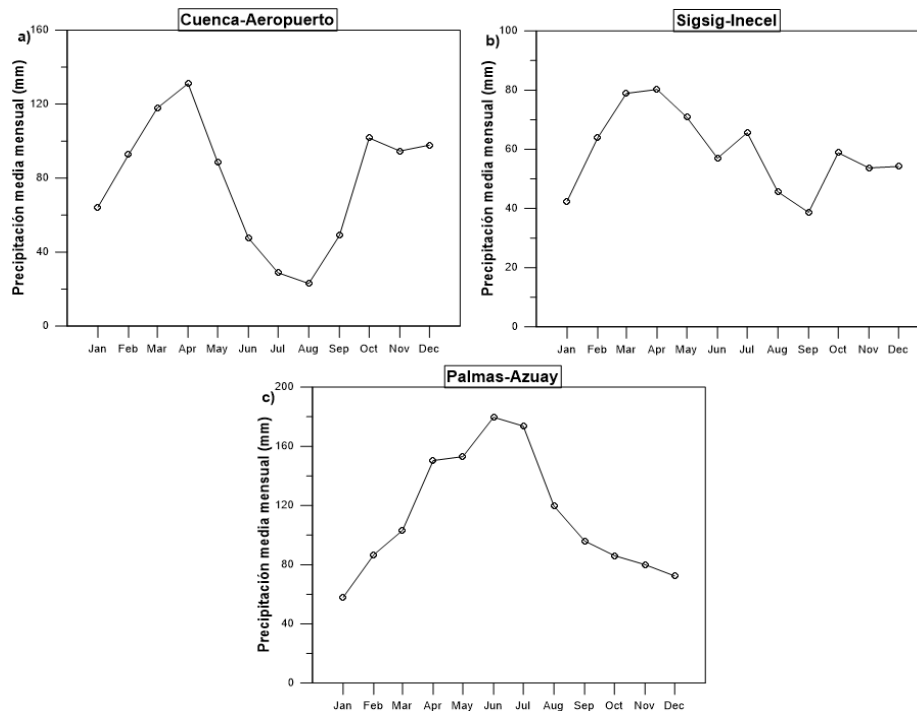
Las diferencias de precipitaciones en los regímenes unimodal 1 y 2 se deben a fuertes efectos orográficos, mientras que los regímenes bimodales se deben a su ubicación en zonas de transición en los flanco oriental y occidental de la cuenca (Célleri et al., 2007).

Los regímenes bimodales son las subregiones que cubren la mayor parte de la cuenca. El régimen bimodal 2 (BM2), es el más extenso y cubre aproximadamente el 50% del área y presenta los valores más altos debido a que el clima está influenciado al oeste por el régimen de la costa del Pacífico, y al este por la masa de aire tropical del Atlántico (Urgilés, 2015). La subregión bimodal 1 (BM1) es la segunda más grande con el 36% del área. El régimen unimodal 1 y 2 (UM1 Y UM2) son los más pequeños con apenas el 1 % y 14% respectivamente (Célleri et al., 2007).

**Figura 2** Regímenes de precipitación de la cuenca del río Paute.

**Fuente:** Célleri et al., (2007)

Los regímenes unimodales y bimodales que se originan en los diferentes meses del año en algunas estaciones de estudio se pueden observar en la Figura 3.



**Figura 3** Ejemplos de regímenes de lluvia: a) Bimodal 1, b) Bimodal 2, c) Unimodal 2 en las estaciones de Cuenca-Aeropuerto, Sigsig-Inecel y Palmas Azuay respectivamente.

Fuente: INAMHI, 2013

Realizado por: Autor

Las estaciones de estudio presentan diferentes regímenes de precipitaciones que se muestran en la Tabla 3.

**Tabla 3** Regímenes de precipitación de las estaciones de estudio.

Código	Nombre	Altura(m s.n.m)	Régimen de precipitación
M067	Cuenca-Aeropuerto	2528	Bimodal 1 (BM1)
M418	Cumbe	2722	Bimodal 1 (BM1)
M141	El Labrado	3424	Bimodal 2 (BM2)
M138	Paute	2162	Bimodal 1 (BM1)
M045	Palmas-Azuay	2412	Unimodal 2 (UM2)
M417	Piscícola Chirimichay	3503	Bimodal 2 (BM2)
M426	Ricaurte-Cuenca	2437	Bimodal 1 (BM1)
M664	Sigsig-Inecel	2613	Bimodal 1 (BM1)

Fuente: Céleri et al., (2007)

Realizado por: Autor



## 2.2 Datos de precipitación

El estudio se realizó con datos mensuales de precipitación de 8 estaciones pluviométricas ubicadas en la cuenca del río Paute por un periodo de 31 años (1980-2010), otorgados por el Instituto Nacional de Meteorología e Hidrología (INAMHI).

Para construir una base de datos fiable se aplicó los siguientes pasos: la selección de estaciones que reúnen los requisitos de calidad y el rellenado de datos faltantes en las series.

Partiendo de la base de datos se realizó un control de la información proporcionada, notando cierta escasez en algunas estaciones pluviométricas. Para rellenar estos datos se aplicó el método de Regresiones Lineales (ecuación 12) en el cual se estimó datos mensuales de una estación de estudio, en base a datos pluviométricos observados en una estación cercana (Rivera, 2014).

Se establece una correlación como esta:

$$Y = a + b * X1 + c * X2 \quad (1)$$

Dónde:

Y: valor de precipitación estimada

Xi: valor de precipitación en estaciones con información completa

a, b, c: constantes de regresión

En el caso de que los datos no presenten una buena correlación se procedió a rellenar los datos faltantes con el valor de la media histórica de ese mes específico para la estación pluviométrica en cuestión (Rivera, 2014), considerando que esto ocurrió en muy pocos casos, lo que asegura que la base de datos final sea de buena calidad. Una vez que se contó con los datos completos se procedió a calcular el índice IPE a través del software RStudio (versión 0.99.491).



## **2.3 Metodología**

### **2.3.1 Índice de precipitación estandarizado (IPE)**

El IPE es un índice meteorológico desarrollado por McKee en 1993, el cual es sencillo y flexible de calcular, siendo necesario un único dato que es la precipitación. Este índice se concibió para cuantificar el déficit de precipitación para varias escalas temporales, las cuales tienen la flexibilidad para representar la naturaleza multiescalar de las sequías y reflejar el impacto en la disponibilidad de los diferentes recursos hídricos (Organización meteorológica mundial, 2012).

El IPE se calcula a partir de niveles de agrupación de registros de datos suficientemente larga, con base en varios periodos de tiempo (Ferrari, 2002). Estos pueden ser mensual, trimestral, semestral anual, bianual, etc., representándose como IPE1, IPE3, IPE6, IPE9, IPE12, IPE24, etc. (Paredes et al., 2008).

Los patrones espaciales de 1, 3, 6, 9, 12 y 24 meses muestran sus características para períodos cortos y largos, clasificados como:

#### **IPE 1**

Indica las condiciones de humedad del suelo y refleja la condición de sequía inmediata. Su climatología se debe comprender correctamente ya que con frecuencia se pueden generar grandes valores tanto positivos como negativos, generando valores erróneos (Servicio Meteorológico Nacional, 2010).

#### **IPE3**

Compara el total de precipitación de un período específico de 3 meses consecutivos, es decir al final del mes de Marzo compara el total de la precipitación de Enero, Febrero y Marzo de ese año. Este patrón espacial brinda la estimación estacional de la precipitación y refleja las condiciones de humedad a corto y mediano plazo (Servicio Meteorológico Nacional, 2010).

#### **IPE6**

Relaciona la precipitación de un período de 6 meses, por ejemplo un IPE6 del mes de Junio compara el total de todas las precipitaciones precedentes. Este



IPE resulta eficaz para indicar las tendencias de precipitación entre periodos estacionales de mediano plazo en la precipitación (Rivera, 2014), y para reflejar caudales y niveles de almacenamiento, en función de la región y época del año (Servicio Meteorológico Nacional, 2010).

### **IPE9**

Indica pautas de precipitación interestacionales en escalas temporales medias. El período de este IPE9 se introduce para pasar de la sequía estacional de corto plazo a sequías de largo plazo (Organización meteorológica mundial, 2012). Este período de tiempo es clave para el monitoreo de períodos secos que tuvieron una duración estacional y que en escalas de tiempo más largas pueden convertirse en sequías hidrológicas o multi-anales (Rivera, 2014).

### **IPE 12**

Revela los patrones de precipitación de larga escala. Este IPE12 es la comparación de la precipitación para un período consecutivo de 12 meses respecto al mismo período para todos los años de datos y sus valores resultantes tienden a estar vinculados con las variaciones de los caudales, niveles de reservorios y en algunos casos en los niveles de aguas subterráneas (Vicente-Serrano & López-Moreno, 2005).

### **IPE 24**

Utiliza el período consecutivo de las precipitaciones de 24 meses y se asocian a cauces fluviales e impactos en los niveles de reserva de agua (Servicio Meteorológico Nacional, 2010)

Para las seis escalas temporales se determinó su valor mensual acumulado correspondiente, dando como resultado 6 sub-series temporales en cada una de las estaciones. Se estimaron los parámetros  $\alpha$  y  $\beta$  de la Distribución de Probabilidad Teórica Gamma (DPTG) asociada a cada una de las sub-series de precipitación acumulada. La función DPTG definida por Mishra & Desai (2005) se detalla a continuación:



$$G(x) = \frac{1}{\beta^\alpha \Gamma(\alpha)} x^{\alpha-1} e^{-x/\beta} \quad (2)$$

Donde  $x > 0$ ,  $x$  es la variable de precipitación;  $\beta$  es un parámetro de escala,  $\beta > 0$ ;  $\alpha$  es el parámetro de forma de la curva,  $\alpha > 0$ , y  $\Gamma(\alpha)$  es la función gamma la cual está descrita a continuación:

$$\Gamma(\alpha) = \int_0^\infty y^{\alpha-1} e^{-y} dy \quad (3)$$

Los parámetros  $\alpha$  y  $\beta$  de la función DPTG se calcula para cada escala de tiempo de acuerdo al interés que se tenga, en este caso: 1, 3, 6, 9, 12 y 24 meses. Edwards & Mckee (1997) sugieren la estimación de estos parámetros empleando la aproximación de Thom (1958) para una máxima probabilidad por medio de las próximas ecuaciones:

$$\hat{\alpha} = \frac{1}{4A} \left( 1 + \sqrt{1 + \frac{4A}{3}} \right) \quad (4)$$

$$\hat{\beta} = \frac{\bar{\bar{x}}}{\hat{\alpha}} \quad (5)$$

En el cual  $n$  es el número de observaciones y  $A$  es igual a:

$$A = \overline{\ln(x)} - \frac{\sum \ln(x)}{n} \quad (6)$$

Los parámetros que se consiguen se los emplea para encontrar la probabilidad acumulada de un evento de precipitación para un mes o cualquier otra escala de tiempo.

$$G(x) = \int_0^x g(x) dx = \frac{1}{\hat{\beta}^{\hat{\alpha}} \Gamma(\hat{\alpha})} \int_0^x x^{\hat{\alpha}-1} e^{-x/\hat{\beta}} dx \quad (7)$$

Debido a que la función DPTG es indefinida para valores de  $x = 0$  y dado que la precipitación puede tener valores nulos, la probabilidad acumulativa se convierte en:

$$H(x) = u + (1 - u) G(x) \quad (8)$$



Donde  $u$  es la probabilidad de que ocurra una precipitación de cero,  $1 - u$  es la probabilidad de que no ocurra precipitación nula. La probabilidad acumulada  $H(x)$ , se transforma en la probabilidad normal estándar  $Z$  con una media de cero y varianza 1, que es el valor del **IPE**. Con el objetivo de facilitar la obtención de los Índices de McKee, los valores de  $Z$  se los puede calcular mediante una conversión aproximada, que utiliza las fórmulas 9 y 10, que convierten la probabilidad acumulada gamma a un valor de probabilidad estándar normal o variable  $Z$  (Abramowitz & Stegun, 1965; Edwards & Mckee, 1997; Hughes & Saunders, 2002).

$$Z = SPI = - \left( k - \frac{c_0 + c_1 k + c_2 k}{1 + d_1 + d_2 k^2 + d_2 k^2} \right) \quad (9)$$

Para  $0 < H(x) \leq 0.5$

$$Z = SPI = + \left( k - \frac{c_0 + c_1 k + c_2 k}{1 + d_1 + d_2 k^2 + d_2 k^2} \right) \quad (10)$$

Para  $0.5 < H(x) \leq 1$

Dónde:

$$K = \sqrt{\ln \left[ \frac{1}{(H(x))^2} \right]} \quad \text{Para } 0 < H(x) \leq 0.5 \quad (11)$$

$$K = \sqrt{\ln \left[ \frac{1}{(1 - H(x))^2} \right]} \quad \text{Para } 0.5 < H(x) < 1 \quad (12)$$

Según la aproximación de Abramowitz & Stegun (1965) los valores de las constantes son:

$c_0 = 2.515517$ ,  $c_1 = 0.802853$ ,  $c_2 = 0.010328$ ,  $d_1 = 1.432788$ ,  $d_2 = 0.189269$ ,  
 $d_3 = 0.001308$

Para determinar los parámetros y cálculo del IPE se estimó las 6 sub-series de



precipitaciones acumuladas (1, 3, 6, 9, 12 y 24 meses), para utilizar el software estadístico RStudio (versión 0.99.491), descargando la librería SPEI (Calculation of the Standardized Precipitation-Evapotranspiration Index (SPEI) and the Standardized Precipitation Index (SPI)) y posteriormente calculando el IPE para todas las escalas temporales, los cuales son ajustados a una función de probabilidad gamma que es transformada en una distribución normal estandarizada. El script que se utilizó para el cálculo del IPE se encuentra detallado en el Anexo A.

### 2.3.2 Categorización de la intensidad del IPE

#### Intensidad

Promedio de valores del índice durante el período en que el mismo está por debajo del umbral seleccionado (Guevara, 2016).

McKee et al. (1993) utilizaron el sistema de clasificación para definir las distintas intensidades de la sequía según los valores del IPE (Tabla 4). Estas categorías aluden al fenómeno de la sequía meteorológica, aquellas cuyo valor de IPE es negativo (Olivares et al., 2016). Una vez calculado el índice se categorizará las sequías según sus intensidades.

**Tabla 4** Valores del índice de precipitación estandarizado (IPE).

Rango IPE	Categoría
-2 y menos	Extremadamente seco (XS)
-1,50 a -1,99	Severamente seco (YS)
-1,00 a -1,49	Moderadamente seco (MS)
-0,99 a 0,99	Normal o aproximadamente normal
1,00 a 1,49	Moderadamente húmedo (MH)
1,50 a 1,99	Extremadamente húmedo (XH)
2,0 y más	Muy húmedo

**Fuente:** *Edwards y McKee, (1997)*

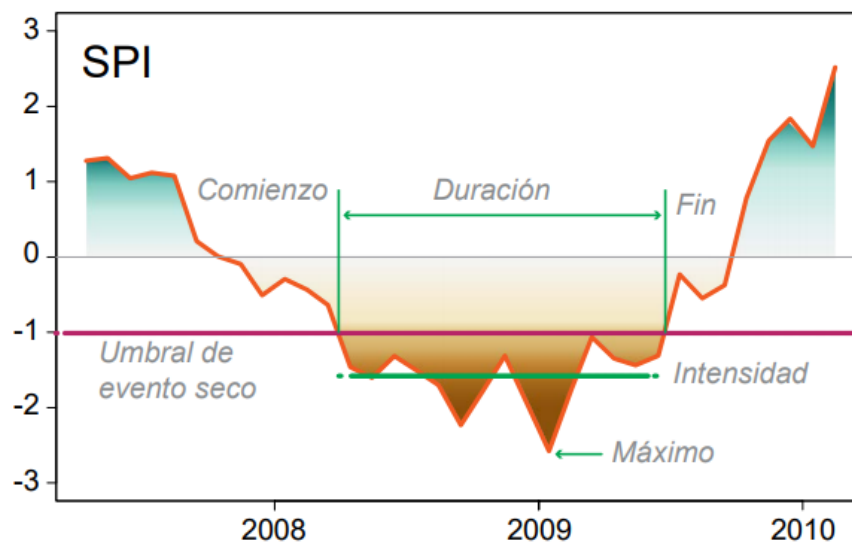
### 2.3.3 Caracterización de las sequías meteorológicas

#### Duración

Es el tiempo (número total de días, meses o años consecutivos) durante el cual las precipitaciones totales registradas son inferiores a la precipitación media de ese período (Valiente, 2001). Bajo este concepto los valores del IPE continuamente negativos que alcanzan el valor de (-1) o inferior, considerando una secuencia seca significativa relacionada con la deficiencia de agua, fueron contabilizados en una hoja de cálculo de Microsoft Office Excel 2013 y descrito dependiendo su categoría de sequía, mediante el tiempo mínimo y máximo que cada una de estas categorías puede durar (Olivares et al., 2016).

#### Eventos

Los eventos de sequía fueron estudiados mediante un esquema (Figura 4) en el cual la línea naranja ilustra una serie de IPE. La línea punteada indica el umbral por debajo del cual se considera sequía. La magnitud del evento es el producto de la duración y la intensidad (área sombreada color marrón debajo del umbral de evento seco) (Skansi et al., 2016). El número de eventos de las diferentes categorías de sequías, se realizó en la misma hoja de cálculo del parámetro duración.



**Figura 4** Esquema de un evento de sequía.

**Fuente:** Skansi et al., (2016)

### **Frecuencia**

Es el número de casos que se originan durante un determinado período. Puede medirse también a través de la probabilidad empírica de que la precipitación o el caudal sean inferiores a la media, o del período de retorno del evento seco (intervalo medio de tiempo dentro del que puede esperarse que ocurra una sequía de determinada magnitud) (Hernández, 2008).

La frecuencia absoluta ( $F_a$ ) se determinó contabilizando el número de meses durante el periodo de estudio (31 años) en el cual los valores eran iguales o inferiores a  $-1.00$ . Esto se determinó para las tres categorías de sequías. La frecuencia relativa ( $F_r$ ) se obtuvo calculando el valor entre la frecuencia absoluta y el número total de datos (Sierra et al., 1994), obteniendo el porcentaje de meses del periodo de estudio en el que se registran eventos de sequías (moderadas, severas y extremas). Para realizar los cálculos, se utilizó una hoja de cálculo de Microsoft Office Excel 2013 (Olivares et al., 2016).

### **Severidad**

Este parámetro se define como el déficit acumulado de caudal o precipitación para la duración del período seco. Dracup et al. (1980) relacionan los parámetros de magnitud, severidad y duración, por lo tanto cualquiera de los tres puede ser conocido (Valiente, 2001b). Utilizando la tabla del periodo de retorno (Tabla 5) se realizó una tabla de severidad relacionada con el número de meses (frecuencia), explicando su relación.

**Tabla 5** Probabilidad de ocurrencia

<b>IPE</b>	<b>Categoría</b>	<b>Número de meses en 31 años</b>	<b>Periodo de retorno</b>
-1,00 a -1,49	Sequía moderada	10	1 mes en 10 años
-1,5 a -1,99	Sequía severa	5	1 mes en 20 años
< -2,00	Sequía extrema	2,5	1 mes en 50 años

**Fuente:** (Organización meteorológica mundial, 2012)



## **Persistencia**

La persistencia se comprende como la tendencia existente de que un período seco (día, mes, año) sea seguido por otro seco y que un período húmedo suceda después de otro húmedo, de acuerdo a un comportamiento similar al de cualquier variable aleatoria (Guevara, 2015). Este parámetro se determinó contabilizando los periodos secos (déficit hídrico) y describiendo el número de sequías con mayor persistencia.

### **2.3.4 Comparación de la ocurrencia y severidad**

La probabilidad de ocurrencia y severidad de los eventos se relacionará entre los eventos extremos de sequía de las estaciones. De esta manera relacionar a las localidades que tengan mayor probabilidad de sufrir eventos extremos de sequía respecto a la menor probabilidad de padecer estos eventos. Esto se realizó mediante las curvas de probabilidad empírica (Gastaldi et al., 2009). Las probabilidades empíricas se basan en los datos observados (IGER, 2016), para lo cual se creó una hoja en Microsoft Excel 2013 con los datos del IPE correspondiente y las probabilidades empíricas de cada uno.

### **2.3.5 Identificación de sequías regionales**

El análisis regional se efectúa realizando una tabla del coeficiente de correlación de Pearson ( $r$ ) entre todas las estaciones, considerando la clasificación de correlaciones descritas en la Tabla 6. A continuación se analiza las sequías registradas durante el periodo (1980-2010) en todas las estaciones de estudio, para determinar si estas sequías fueron puntuales o regionales.

**Tabla 6** Interpretación del coeficiente 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

**Fuente:** Bisquerra, (1989)



### **3. RESULTADOS Y DISCUSIONES**

Los cálculos se realizaron para todas las escalas temporales y estaciones pluviométricas, sin embargo las escalas temporales de 3 y 12 meses representaron gráficamente mejor los resultados, debido a sus características particulares que poseen una mayor sensibilidad a los cambios de precipitación reflejan las sequías a corto y largo plazo. Por otro lado las estaciones Piscícola Chirimichay, Cuenca-Aeropuerto y Palmas-Azuay ubicadas en la cuenca alta, media y baja respectivamente, son las que demarcan e interpretan una mayor diversidad de resultados, por sus regímenes de precipitaciones (BM2-BM1-UM2) que influyen en los resultados del IPE, mostrando comportamientos diferentes entre una estación y otra. Por estas razones las escalas temporales de 3 y 12 meses, así como las estaciones Piscícola Chirimichay, Cuenca-Aeropuerto y Palmas-Azuay fueron escogidas para la categorización y caracterización de sequías meteorológicas.

Los resultados de las demás escalas temporales para las otras estaciones pluviométricas utilizadas en el estudio, se encuentran detallados en el Anexo B, además de las gráficas de frecuencias, tabla de frecuencias, matrices de correlaciones, curvas de probabilidad empíricas en los Anexos C, D, E y F respectivamente.

#### **3.1 Índice de Precipitación Estandarizado (IPE)**

##### **3.1.1 IPE 3**

La intensidad de la sequía para todo el periodo de registro en las estaciones Piscícola Chirimichay, Cuenca-Aeropuerto y Palmas-Azuay en la escala temporal de 3 meses (IPE3) se presenta en la Figura 5.

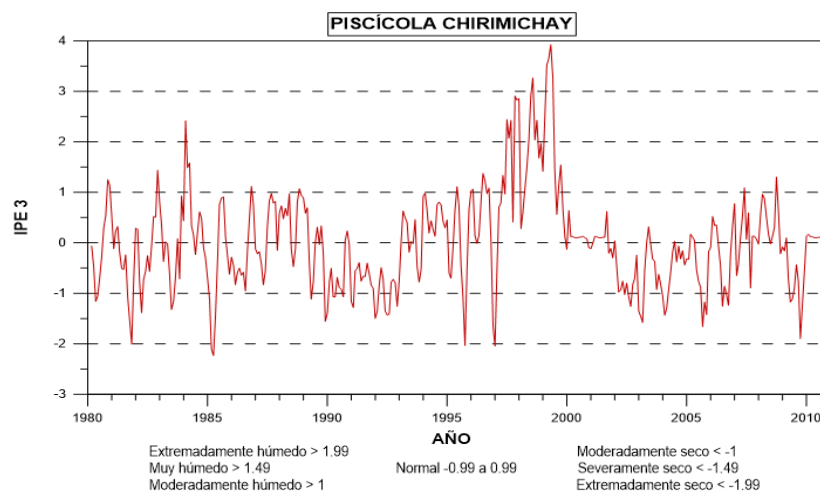
En la estación Piscícola Chirimichay se observó que gran parte del periodo registró eventos de sequías. En los años 1980, 1982-1983, 1989-1992, 2002, 2004, 2006 y 2009 se registró en la estación eventos de sequías moderadas (-1,00 a -1,49). Durante 1989, 1992, 2003 y 2009 sequías severas (-1,50 a -1,99) y en 1981, 1985, 1995 y 1997 sequías extremas con valores  $< -2,00$ .



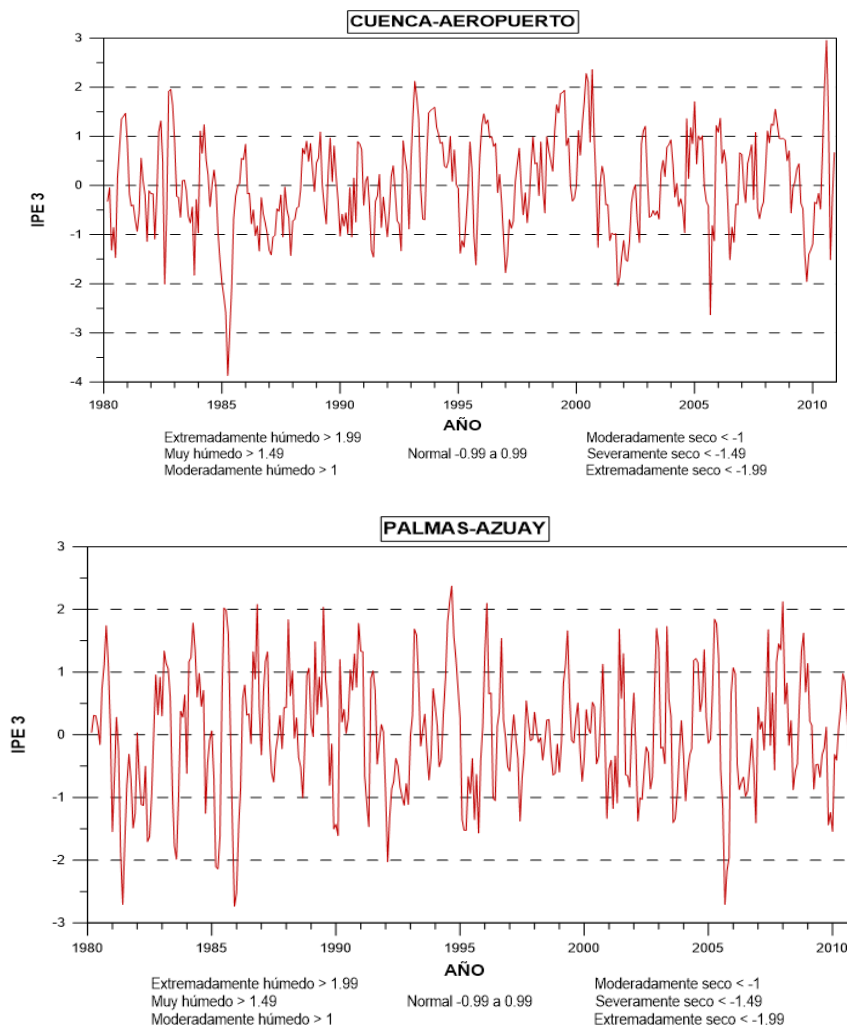
La estación Cuenca-Aeropuerto presentó sequías moderadas en los años 1980-1982, 1986-1987, 1990-1992, 1995, 2000, 2002 y 2006. En 1983, 1995, 1997 y 2010 sequías severas y en los años 1982, 1985, 2001 y 2005 sequías extremas.

En la estación Palmas-Azuay se identificaron sequías moderadas en los años 1981-1982, 1984, 1991-1992, 1995-1997, 2000-2004, 2006 y 2009. Las sequías severas se observaron en los años 1981-1983, 1989-1990, 1995 y 2010, y las sequías extremas en 1981, 1985-1986, 1992 y 2005.

En las tres estaciones la intensidad predominante es la moderada. Es importante recalcar que estas estaciones pluviométricas registraron un año extremadamente seco (1985). Sin embargo Cuenca-Aeropuerto presentó la sequía extrema de mayor intensidad con un valor de -3.87, seguido por Palmas-Azuay con -2.74 y Piscícola Chirimichay con -2.24. Es interesante indicar que aquellas estaciones pluviométricas con mayores valores de intensidad no necesariamente son zonas donde las sequías ocurren frecuentemente (Olivares et al., 2016).







**Figura 5** Comparación de los valores de los índices de precipitación estandarizado en la escala temporal de tres meses (IPE 3), para las estaciones de Piscícola Chirimichay, Cuenca-Aeropuerto y Palmas-Azuay.

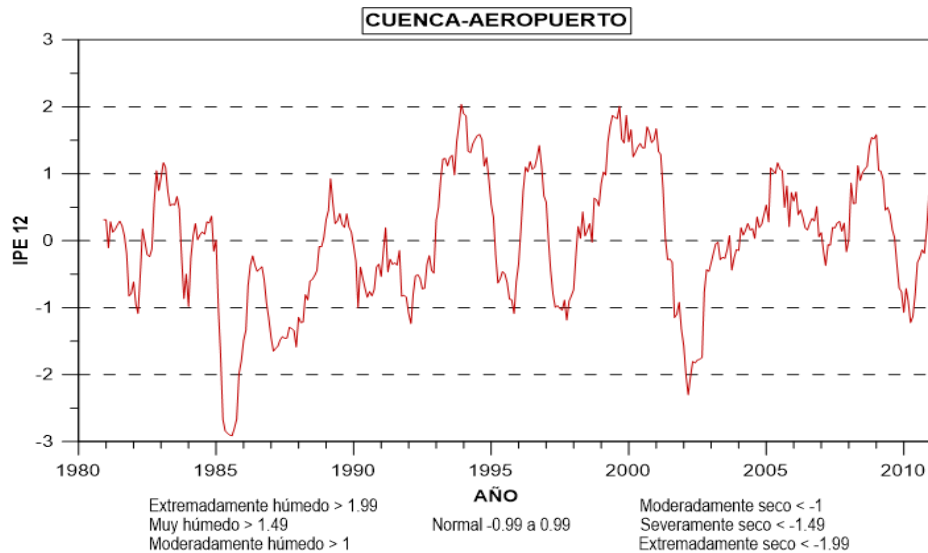
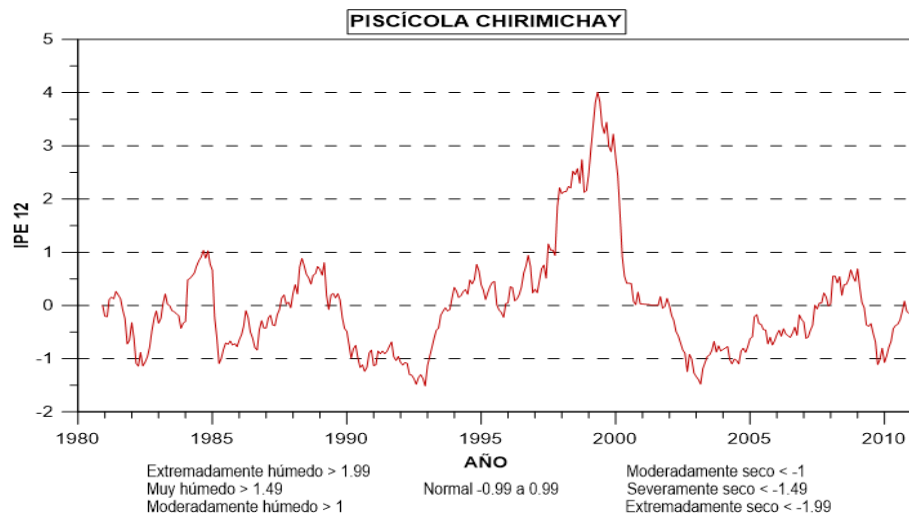
### 3.1.2 IPE 12

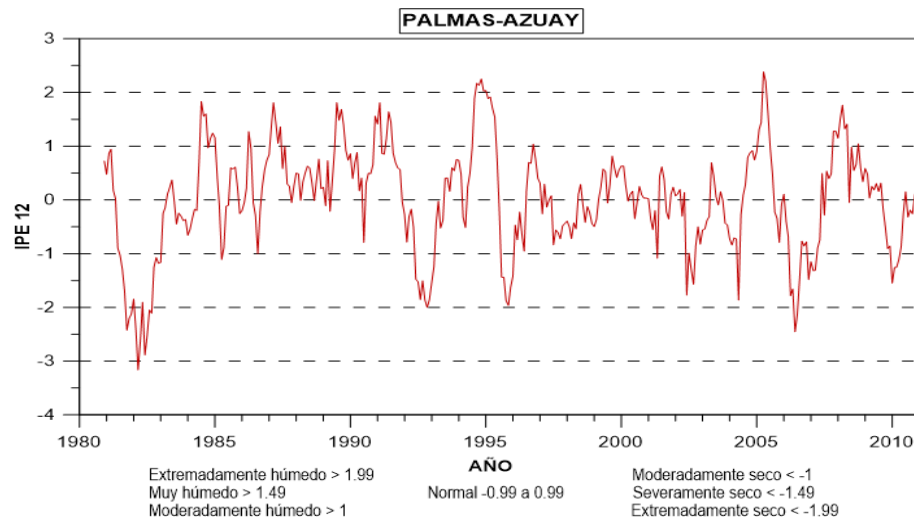
La Figura 6 muestra la comparación del Índice de Precipitación Estandarizado en la escala temporal de 12 meses (IPE12).

La estación Piscícola Chirimichay en la escala anual dentro del periodo de estudio mostró sequías moderadas en los años 1982, 1985, 1990-1992, 2002-2004, 2009 y 2010, mientras que las sequías severas se observaron solo en el año 1992. En esta escala no se registraron sequías extremas. Cuenca-Aeropuerto presentó sequías moderadas en los años 1982, 1986, 1990, 1992, 1995, 1997, 2001 y 2010, sequías severas en 1987, y sequías extremas en 1985 y 2002. En Palmas-Azuay las sequías moderadas se observaron en 1985-1986, 2001, 2006 y 2007, sequías severas en 1992, 2002, 2004 y 2010, y sequías extremas en 1981-1982, 1992 y 2006.

La escala anual muestra una gran variación de valores de IPE12, en la cual se resaltó que Piscícola Chirimichay al igual que el IPE3 es la estación que difiere con frecuencia en las distintas categorías de sequías, mostrando que en esta escala solo se originaron eventos de sequías moderadas y severas, excluyendo las sequías extremas. Sin embargo Cuenca-Aeropuerto y Palmas-Azuay si registraron sequías extremas en ciertos años.

La intensidad del IPE anual refleja las condiciones de sequías a largo plazo, con lo cual se podría establecer ciertos impactos y medidas preventivas en las comunidades (Olivares, 2016).





**Figura 6** Comparación de los valores de los índices de precipitación estandarizado en la escala temporal de 12 meses (IPE12), para las estaciones de Piscícola Chirimichay, Cuenca-Aeropuerto y Palmas-Azuay.

Se puede comprobar que las escalas temporales de 3 y 12 meses poseen la mayor sensibilidad a los cambios de precipitación representando los eventos de sequías a corto y largo plazo, lo cual coincide con los resultados de los estudio de Penalba & Rivera (2015), Vicario et al (2015) y Loaiza et al (2015).

## 3.2 Caracterización de las sequías meteorológicas

### 3.2.1 Duración

#### Escala Trimestral

La duración de sequías moderadas, severas y extremas para la escala temporal de 3 meses se muestra en la Tabla 7, en donde la estación Cuenca- Aeropuerto presentó la mayor duración de sequías moderadas y severas respecto a Palmas-Azuay y Piscícola Chirimichay, mientras que la duración de sequías extremas coincide con la duración que se registró en la estación de Palmas-Azuay.

En el periodo de estudio la suma de todos los eventos de sequías moderadas registró duraciones superiores a cuatro años. Las duraciones totales de los eventos de sequías severas y extremas no fueron mayores a cuatro y un año respectivamente. Sin embargo el análisis se realizó detalladamente para los eventos más extremos y representativos.



En la Figura 5 se pueden observar sequías comunes en las tres estaciones en el año 1981, con duraciones de 1 a 3 meses. Palmas-Azuay mostró al menos dos meses de sequías severas en los meses de Mayo y Julio, mientras que la sequía extrema duró solo el mes de Junio. Las sequías en Piscícola Chirimichay empezaron en Septiembre con una sequía moderada, seguida en Octubre por una sequía severa y terminando en Noviembre con una sequía extrema, mientras que en la estación Cuenca-Aeropuerto su sequía fue moderada y duró solo el mes de Noviembre.

Las sequías más largas se registraron en el año 1985, las cuales coinciden en las 3 estaciones en los meses de Marzo-Abril con sequías extremas ( $<-2,00$ ). Cuenca-Aeropuerto registró la sequía más larga que duró 7 meses. Esta sequía tuvo la siguiente evolución: en Diciembre de 1984 y Enero de 1985 fue severa ( $-1,50$  a  $-1,99$ ), y de Febrero a Junio de 1985 fue extrema ( $<-2,00$ ). La duración para la estación de Piscícola Chirimichay y Palmas-Azuay fue de 4 y 3 meses respectivamente, pero en ambas estaciones las sequías finalizaron en Mayo de 1985 con sequías moderadas para Piscícola Chirimichay y sequías severas para Palmas-Azuay.

En 2005, la estación Cuenca-Aeropuerto presento una sequía extrema que duró solo el mes de Septiembre, mientras que en Palmas-Azuay duró 4 meses, que inició en Agosto con sequía severa, mientras que Septiembre y Octubre fue extrema y finalizó en Noviembre con sequía severa. La sequía en Piscícola Chirimichay duró 3 meses: en Septiembre fue severa, y en Octubre-Noviembre moderada.

**Tabla 7** Resultados del número de eventos, duración total y probabilidad de ocurrencia en la escala trimestral (IPE3) de las estaciones Piscícola Chirimichay, Cuenca-Aeropuerto y Palmas-Azuay.

Estación	Umbral	Eventos	Duración total	Probabilidad de ocurrencia	Probabilidad de ocurrencia anual
Piscícola Chirimichay	-1,00 a -1,49	11	48	11 eventos en 31 años	35.00%
	-1,5 a -1,99	5	43	5 eventos en 31 años	16.12%
	< -2,00	4	5	4 eventos en 31 años	12.90%
Cuenca-Aeropuerto	-1,00 a -1,49	11	56	11 eventos en 31 años	35.48%
	-1,5 a -1,99	6	48	6 eventos en 31 años	19.35%
	< -2,00	4	8	4 eventos en 31 años	12.90%
Palmas-Azuay	-1,00 a -1,49	15	55	15 eventos en 31 años	48.00%
	-1,5 a -1,99	7	47	7 eventos en 31 años	22.58%
	< -2,00	5	8	5 eventos en 31 años	16.12%

### Escala anual

En la Tabla 8 se muestran las duraciones de las sequías en la escala anual, en donde la estación Palmas-Azuay presentó la duración más larga de sequías moderadas y extremas respecto a las otras estaciones. Piscícola Chirimichay registró la menor duración de sequías moderadas y severas, considerando que no se registraron eventos de sequías extremas. Cuenca-Aeropuerto a pesar de registrar estas categorías de sequías, presentó la mayor duración solo de sequías severas.

En la escala anual las duraciones de los eventos totales de sequías moderadas, severas y extremas fueron las mismas que en la escala trimestral.

Cuenca-Aeropuerto registró la sequía más larga que duró 16 meses desde Diciembre de 1986 a Marzo de 1988, con sequías moderadas y severas. En Febrero de 1985 y Febrero de 1986 la sequía duró 13 meses llegando a registrarse sequías moderadas en el mes de Febrero de ambos años y sequías extremas en Agosto, Septiembre y Octubre de 1985.

Palmas-Azuay registró duraciones de sequías moderadas y severas mayores e inferiores a cuatro años respectivamente, al igual que la estación Cuenca-Aeropuerto, mientras que las sequías extremas mostraron duraciones mayores



a un año. Esta estación registró una sequía con duración de 19 meses, desde Julio de 1981 a Enero de 1983. Este evento empezó y terminó con sequías moderadas que duraron tres meses, desde Julio a Agosto de 1981 y de Octubre de 1982 a Enero de 1983. Las sequías severas mostraron duraciones de 1 mes, en Septiembre de 1981, Enero y Mayo de 1982, mientras que las sequías extremas duraron de 3 a 4 meses, desde Octubre a Diciembre de 1981 y de Junio a Septiembre de 1982 respectivamente.

Piscícola Chirimichay mostró que la mayor parte del periodo de estudio registró solo sequías moderadas y severas con duraciones mayores a tres años. La sequía más larga que registró esta estación duró 13 meses, desde Enero de 1992 a Enero de 1993, en la cual solo el mes de Diciembre de 1992 registró una sequía severa.

La duración puede sobrevenir rápidamente en algunos regímenes climáticos pero, por lo general, las sequías tardaron como mínimo uno o tres meses en hacerse patentes, una vez iniciada, esta puede durar meses o años (Olivares, 2016), como el caso de la escala anual en la cual sus duraciones llegan a ser superiores a un año.

**Tabla 8** Resultados del número de eventos, duración total y probabilidad de ocurrencia en la escala anual (IPE12) de las estaciones Piscícola Chirimichay, Cuenca-Aeropuerto y Palmas-Azuay.

Estación	Umbral	Eventos	Duración total	Probabilidad de ocurrencia	Probabilidad de ocurrencia anual
Piscicola Chirimichay	-1,00 a -1,49	8	41	8 eventos en 31 años	25.80%
	-1,5 a -1,99	1	40	1 eventos en 31 años	3.22%
	-2 y menos	0	0	0 eventos en 31 años	0%
Cuenca-Aeropuerto	-1,00 a -1,49	6	52	6 eventos en 31 años	19.35%
	-1,5 a -1,99	1	42	1 eventos en 31 años	3.22%
	-2 y menos	2	10	2 eventos en 31 años	6.45%
Palmas-Azuay	-1,00 a -1,49	4	54	4 eventos en 31 años	12.90%
	-1,5 a -1,99	5	41	5 eventos en 31 años	16.12%
	-2 y menos	3	13	3 eventos en 31 años	9.68%



### 3.2.2 Eventos

En la Tabla 7 también observamos el resultado del número de eventos en la escala trimestral, en la cual se puede observar que la estación Palmas-Azuay presentó el mayor número de eventos de sequías moderadas, severas y extremas con respecto a las estaciones de Piscícola Chirimichay y Cuenca-Aeropuerto.

En la escala anual (Tabla 8), se destaca que el número de eventos de sequías moderadas es mayor en la estación Piscícola Chirimichay, donde no se registran eventos de sequía extrema, sin embargo Palmas-Azuay registró el mayor número de eventos de sequías severas y extremas, mientras que Cuenca-Aeropuerto presenta el mayor número de eventos de sequías moderadas respecto a Palmas-Azuay y menor que Piscícola Chirimichay. En este caso, la escala anual muestra mayores variaciones en los comportamientos de las diferentes categorías de sequías que se registran en las estaciones.

La estación Palmas-Azuay por su ubicación y características climáticas comúnmente registra la mayor presencia de eventos de sequías, mostrando un comportamiento diferente con las demás estaciones. Entre los eventos de sequías moderadas, severas y extremas, las estaciones en el periodo de estudio apuntaron un mayor número de eventos de sequías moderadas, las cuales necesitan el umbral más bajo para ser considerada como uno de los eventos de sequías.

### 3.2.3 Frecuencia

Las tablas con el número de meses (frecuencia absoluta) y porcentaje de meses (frecuencia relativa) en la escala trimestral y anual en la cual se registran eventos de sequías (moderadas, severas y extremas), se encuentran detallados en los anexos D.

#### **Frecuencia relativa (%) de sequías moderadas (IPE3 - IPE12)**

En la Figura 7 se muestran las frecuencias de estas sequías, en donde el mayor porcentaje de meses con sequías moderadas se registró en las estaciones de Piscícola Chirimichay y Cuenca-Aeropuerto con el mismo porcentaje, mientras que la frecuencia más baja de estas sequías se presentó en Palmas-Azuay.



La escala anual como se muestra en la Figura 8 mantiene la mayor frecuencia para Piscícola Chirimichay y la menor frecuencia para Palmas-Azuay al igual que la escala trimestral. Cuenca-Aeropuerto registró un porcentaje de meses intermedio entre las otras estaciones.

### **Frecuencia relativa (%) de sequías severas (IPE3 – IPE12)**

En el IPE3 (Figura 7) el análisis de frecuencia muestra que el mayor y menor porcentaje de meses de sequías severas se registran en las estaciones de Palmas-Azuay y Piscícola Chirimichay respectivamente, mientras que Cuenca-Aeropuerto se encuentra con un porcentaje intermedio entre ambas estaciones.

En el IPE12 (Figura 8), el porcentaje de meses mayor y menor de estos eventos de sequías son para Palmas-Azuay y Piscícola Chirimichay respectivamente al igual que el IPE3. Sin embargo el porcentaje de meses de esta categoría de sequías es menos frecuente que las moderadas.

### **Frecuencia relativa (%) de sequías extremas (IPE3 – IPE12)**

Las sequías extremas tienen el menor porcentaje de meses en comparación con las sequías moderadas y severas. En el IPE3 (Figura 7), el mayor porcentaje de meses con sequías extremas se dan en las estaciones de Cuenca-Aeropuerto y Palmas-Azuay, mientras que el menor porcentaje se da en Piscícola Chirimichay.

En el IPE12 (Figura 8) el mayor porcentaje de meses se registra en Palmas-Azuay, mientras que el menor porcentaje de estos meses se da en la estación Cuenca-Aeropuerto, considerando que en la estación de Piscícola Chirimichay no se registró ningún mes con eventos de sequía extrema.

Las categorías de sequías en Cuenca-Aeropuerto cambian de una escala temporal a otra. Cuenca-Aeropuerto presentó más similitud con la estación Piscícola Chirimichay por encontrarse ubicadas en una zona de régimen bimodal. Por otro lado en la estación Palmas-Azuay en donde el régimen es unimodal los eventos de sequías son más comunes. La frecuencia de los meses de sequías moderadas son los que presentan el mayor número respecto a las demás categorías, ya que el umbral de esta categoría es el mínimo.



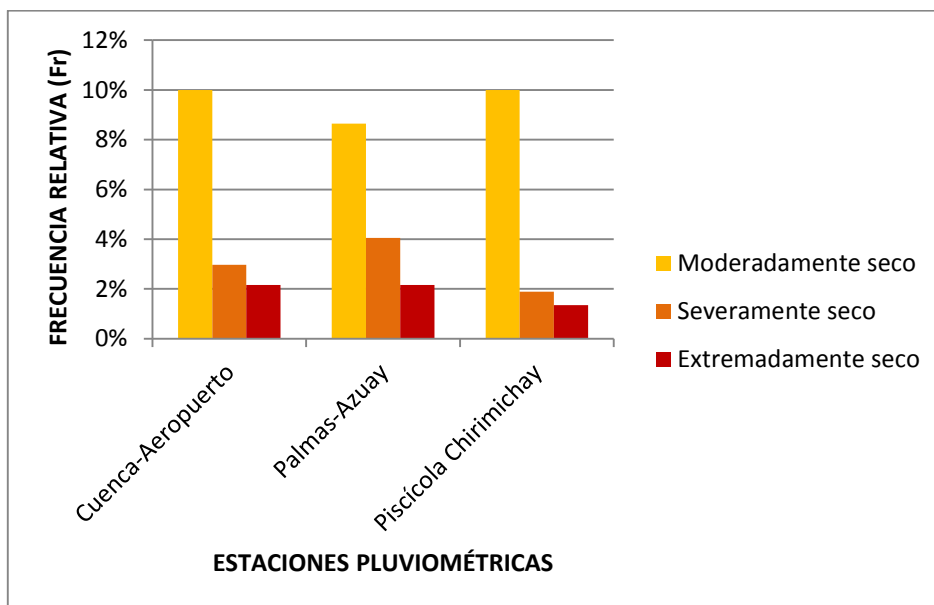


Figura 7 Frecuencia relativa (%) de sequías en la escala trimestral.

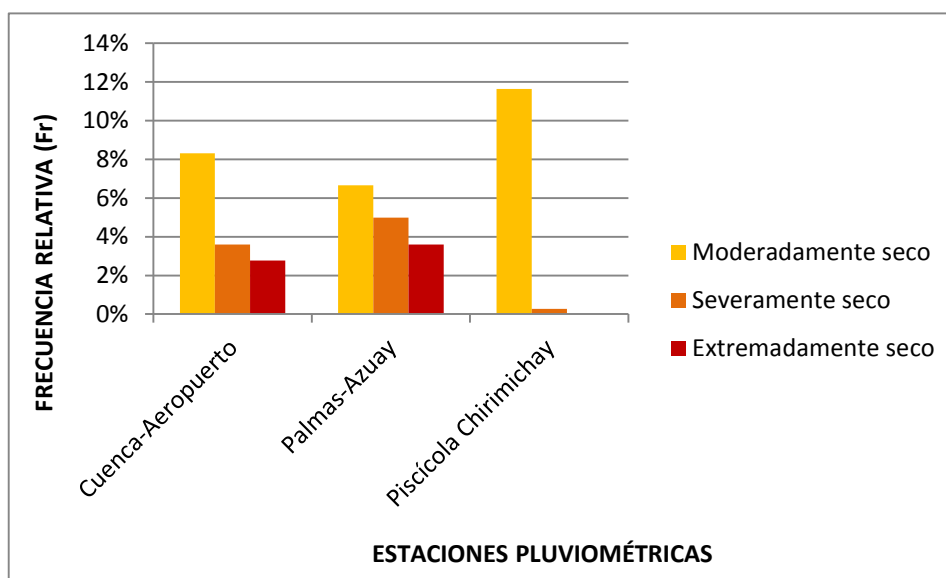


Figura 8 Frecuencia relativa (%) de sequías en la escala anual.

### 3.2.4 Severidad

En este caso uno de los eventos más severos que se registró en la escala trimestral ocurrió en 1985, el cual duró 7, 4 y 3 en las estaciones Cuenca-Aeropuerto, Piscícola Chirimichay y Palmas-Azuay. En la escala anual el evento más severo que se observó en Cuenca-Aeropuerto se dio en los años de Diciembre de 1986 a Marzo de 1988 (16 meses). En Palmas-Azuay y Piscícola Chirimichay sus eventos más severos tuvieron una duración de 19 y 13 meses respectivamente. En Cuenca-Aeropuerto y Palmas-Azuay las intensidades



cubrieron todas las categorías de sequías, mientras que Piscícola Chirimichay no registró sequías extremas.

La severidad tiene relación con la intensidad y duración. Es decir que una sequía moderada con una duración de 6 meses presenta una severidad mayor que si se presentara una sequía extrema que dure solo un mes, por eso uno de los parámetros fundamentales para la severidad es la duración, ya que determina que tan severos son los eventos aunque su intensidad no necesariamente sea la más fuerte (sequías extremas).

En las tablas 9 y 10 se muestran los periodos de retorno en la escala trimestral y anual correspondientemente, observando que las sequías moderadas tienen un menor periodo de retorno, el cual se da cada año aproximadamente, mientras que el periodo de retorno de las sequías extremas es mayor.

**Tabla 9** Resultados del número de meses (frecuencia) y periodo de retorno en la escala trimestral

Estaciones	Intensidad	Número de meses en 31 años	Periodo de retorno
Cuenca- Aeropuerto	-1,00 a -1,49	37	1 mes en 1 año
	-1,5 a -1,99	11	1 mes en 3 años
	< -2,00	8	1 mes en 4 años
Palmas -Azuay	-1,00 a -1,49	32	1 mes en 1 año
	-1,5 a -1,99	15	1 mes en 2 años
	< -2,00	8	1 mes en 4 años
Piscícola Chirimichay	-1,00 a -1,49	37	1 mes en 1 año
	-1,5 a -1,99	6	1 mes en 5 años
	< -2,00	5	1 mes en 6 años

**Tabla 10** Resultados del número de meses (frecuencia) y periodo de retorno en la escala anual

Estaciones	Intensidad	Número de meses en 31 años	Periodo de retorno
Cuenca- Aeropuerto	-1,00 a -1,49	29	1 mes en 1 año
	-1,5 a -1,99	13	1 mes en 2 años
	< -2,00	10	1 mes en 3 años
Palmas -Azuay	-1,00 a -1,49	23	1 mes en 1 año
	-1,5 a -1,99	18	1 mes en 2 años
	< -2,00	13	1 mes en 2 años
Piscícola Chirimichay	-1,00 a -1,49	40	1 mes en 1 año
	-1,5 a -1,99	1	1 mes en 31 años
	< -2,00	0	Ninguna en 31 años



### 3.2.5 Persistencia

La persistencia de sequías en el periodo de 1980-2010 en la escala trimestral y anual se puede observar en la Figura 5 y 6.

Un análisis más detallado de la escala trimestral en la estación Cuenca-Aeropuerto, reveló que la persistencia de sequías solía ocurrir esporádicamente en los meses de Noviembre a Junio. En un contexto general, se observó que: 1) Las sequías moderadas no persisten más de 4 meses (Enero-Abril 1987); 2) Las sequías severas de Diciembre-Enero y Febrero-Marzo (1985 y 2002), las cuales no persistían más de 2 meses; y 3) Las sequías extremas no persisten más de 5 meses (Febrero-Junio 1985).

En Palmas-Azuay las sequías ocurrían en los meses de Marzo-Agosto. En esta estación se observó que: 1) Las sequías moderadas no persistían más de 3 meses (Marzo-Mayo 2002); 2) Las sequías severas, con una persistencia no mayor a 2 meses en los meses de Junio-Julio y Julio-Agosto (1982 y 1983); y 3) Las sequías extremas en Marzo-Abril (1985), manteniéndose una persistencia de 2 meses.

En Piscícola Chirimichay las mayores persistencia de sequías se observó en los meses entre Enero-Agosto, en los cuales se percibió que: 1) Las sequías moderadas no persistían más de 3 meses, como en los meses de Junio-Agosto y Enero-Marzo (1992 y 2004); 2) Las sequías severas no persistían más de 1 mes; y 3) Las sequías extremas no mostraban persistencias mayor a 2 meses (Marzo-Abril 1985).

En la escala anual la persistencia aumento considerablemente en algunas estaciones y también en las categorías de sequías. En Cuenca-Aeropuerto se mostró que: 1) Las sequías moderadas persistieron hasta siete meses desde Mayo-Noviembre (1987); 2) Las sequías severas con una persistencia de hasta cinco meses desde Mayo-Septiembre (2002); y 3) Las sequías extremas no persistían más de siete meses de Abril a Octubre (1985).

Palmas-Azuay presentó una persistencia igual a 4 meses de sequías moderadas desde Octubre (1982) a Enero (1983), sequías severas con persistencias de 2



meses Abril-Mayo (2006), y sequías extremas con persistencias de 4 meses desde Junio-Septiembre (1982).

Piscícola Chirimichay por el contrario represento la persistencia más alta de sequías moderadas con 11 meses desde Enero-Noviembre (1992), mientras que las sequías severas no persistieron más de 1 mes. Las sequías extremas por el contrario no se registraron en esta estación.

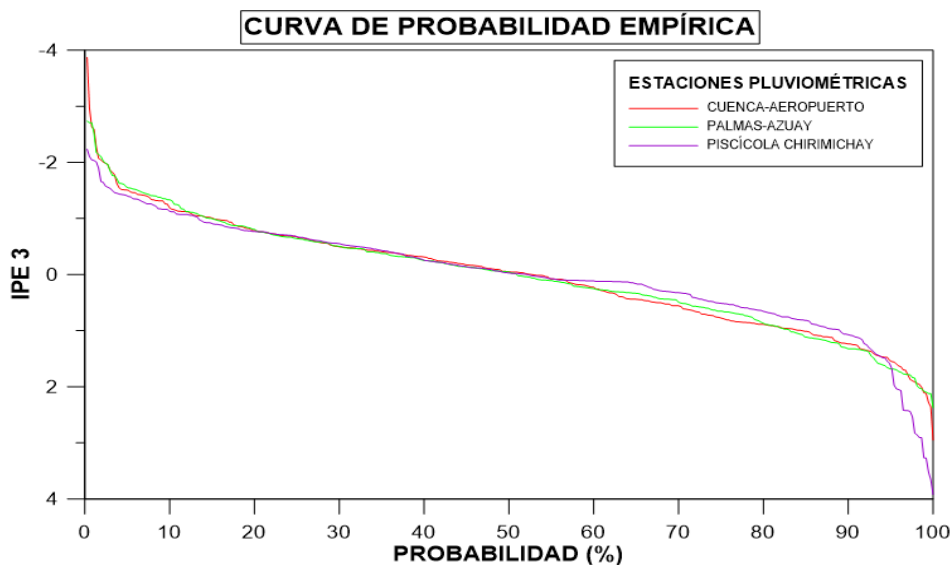
Es más común que los eventos de sequías extremas se registran continuamente, es por eso que en estaciones como Cuenca-Aeropuerto la persistencia de sequías extremas sea mayor que las otras categorías, mientras que las sequías moderadas pueden presentar persistencias mayores o menores que las sequías extremas, ya que son eventos más comunes.

### **3.3 Comparación de la ocurrencia y severidad**

Las probabilidades de ocurrencia de eventos de sequía varían en las distintas estaciones pluviométricas, sin embargo este análisis se realizó para las estaciones de Piscícola Chirimichay, Cuenca-Aeropuerto y Palmas Azuay, debido a su relevancia de resultados y comportamiento diferentes, que se demarcan claramente en las Figuras 11 y 12 para la escala trimestral y anual correspondientemente. Las curvas de probabilidades empíricas para todas las estaciones de estudio en las escalas trimestral y anual se pueden observar en el Anexo G.

Los eventos de sequías moderadas, severas y extremas representan una baja probabilidad de ocurrencia entre el 0 y 15% aproximadamente para todas las estaciones (Figura 11). Las sequías extremas en las estaciones Piscícola Chirimichay, Cuenca-Aeropuerto y Palmas-Azuay presentan la menor probabilidad de ocurrencia con valores entre el 0 y 0.4%. Sin embargo es importante considerar que las sequías de mayor intensidad se observan en la estación Cuenca Aeropuerto, mientras que Piscícola Chirimichay muestra la menor intensidad en las diferentes categorías de sequías. Las sequías severas a pesar de que tienen una mayor probabilidad de ocurrencia que las extremas también presentan valores bajos de hasta el 0.7 % aproximadamente, mientras

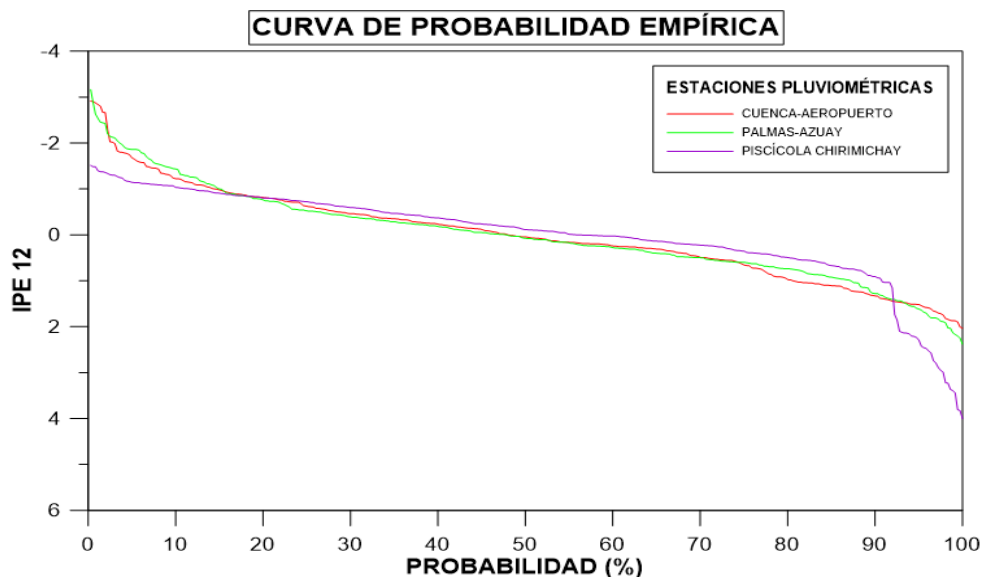
que las sequías moderadas son más frecuentes y con probabilidades de ocurrencia de hasta el 15%.



**Figura 9** Probabilidad de ocurrencia en la escala temporal de 3 meses.

La curva de probabilidad empírica de la escala anual (Figura 12), muestra que las sequías extremas tienen una baja probabilidad entre 0 y 0.4% para todas las estaciones a excepción de Piscícola Chirimichay, la cual no presenta ninguna probabilidad de que se originen estos eventos. Las sequías severas tienen un rango de probabilidad de ocurrencia entre 0.7 y 10% para Cuenca-Aeropuerto y Palmas-Azuay, mientras que para Piscícola Chirimichay apenas el 0.1%. Las probabilidades de ocurrencia de las sequías moderadas van del 10 al 14% aproximadamente.

En ambas escalas la estación Piscícola Chirimichay resalta su comportamiento diferente, que la distingue de las demás estaciones. En la escala anual las probabilidades de ocurrencia de los eventos de sequías (moderadas, severas y extremas) son hasta de un 15%, mientras que en la escala trimestral estos eventos tienen una probabilidad de ocurrencia de hasta el 13%. Entre la escala temporal de 3 y 12 meses existe una variación de resultados que resaltan en la escala anual y muestran los distintos comportamientos que se presentan no solo en la escala temporal sino también en las diferentes estaciones.



**Figura 10** Probabilidad de ocurrencia en la escala temporal de 12 meses.

### 3.4 Identificación de sequías regionales

Para determinar en qué grado las sequías tenían un comportamiento regional se incluyó y analizó todas las estaciones pluviométricas en las escalas temporales de 3 y 12 meses, determinando las sequías regionales y puntuales que se registraron en el periodo de estudio. En la Tabla 11 y 12 se muestran las matrices de correlaciones de las 8 estaciones que se utilizó como base en el estudio, en la escala trimestral y anual, en donde las correlaciones categorizadas como muy altas de acuerdo a la Tabla 6 muestran que la mejor correlación se observa en las estaciones Cuenca-Aeropuerto y Ricaurte-Cuenca que se encuentran en la cuenca media, sin embargo las estaciones de Palmas-Azuay y Piscícola-Chirimichay ubicadas en la cuenca baja y alta respectivamente presentan correlaciones bajas y moderadas.



**Tabla 11** Matriz de correlación en la escala temporal de 3 meses.

Estaciones pluviométricas	Cuenca-Aeropuerto	Cumbe	El Labrado	Palmas-Azuay	Paute	Piscícola Chirimichay	Ricaurte-Cuenca	Sigsig-Inecel
Cuenca-Aeropuerto	1	0.53	0.56	0.30	0.57	0.45	0.91	0.41
Cumbe		1	0.56	0.39	0.46	0.46	0.53	0.40
El Labrado			1	0.44	0.56	0.57	0.56	0.41
Palmas-Azuay				1	0.54	0.37	0.32	0.48
Paute					1	0.41	0.53	0.52
Piscícola Chirimichay						1	0.41	0.44
Ricaurte-Cuenca							1	0.39
Sigsig-Inecel								1

**Tabla 12** Matriz de correlación en la escala temporal de 12 meses.

Estaciones pluviométricas	Cuenca-Aeropuerto	Cumbe	El Labrado	Palmas-Azuay	Paute	Piscícola Chirimichay	Ricaurte-Cuenca	Sigsig-Inecel
Cuenca-Aeropuerto	1	0.53	0.68	0.20	0.72	0.41	0.89	0.48
Cumbe		1	0.53	0.44	0.53	0.53	0.57	0.44
El Labrado			1	0.17	0.73	0.57	0.59	0.58
Palmas-Azuay				1	0.26	0.24	0.32	0.46
Paute					1	0.46	0.66	0.53
Piscícola Chirimichay						1	0.35	0.54
Ricaurte-Cuenca							1	0.47
Sigsig-Inecel								1

Adicional a las tablas de correlación se determinó el nivel de significancia a través del p-valor (Anexo F), con el objetivo de saber que tan significativas son las correlaciones. Los valores que se obtuvieron fueron menores a 0.05, cumpliendo con la función  $-p \leq 0.05$ , en la cual se determinó que la diferencia fue estadísticamente significativa.



## **Análisis de sequías regionales**

Un análisis de sequías regionales se representaría mejor mediante un mapa, sin embargo en este estudio no se realizó un mapa, debido a la baja densidad de estaciones y ubicación espacial dispersa en la cuenca del paute, lo cual no permite realizar un mapeo apropiado. Para realizar un mapa es conveniente tener un número representativo de estaciones que se encuentren distribuidas espacialmente en toda la cuenca para evitar interpretaciones erróneas.

### **Sequías Regionales en la escala temporal de 3 meses**

Dentro del periodo de estudio (1980-2010) se observó solo una sequía regional en el año 1985. Su inicio y final difiere en ciertos meses y estaciones, aunque es notable la sequía que se presenta en los meses de Marzo-Abril de 1985 en todas las estaciones, mostrando variaciones en su intensidad. La sequía de este año es la más destacada no solo por su intensidad sino también por su larga duración. Algunas estaciones registraron eventos de sequías en los mismos años como:

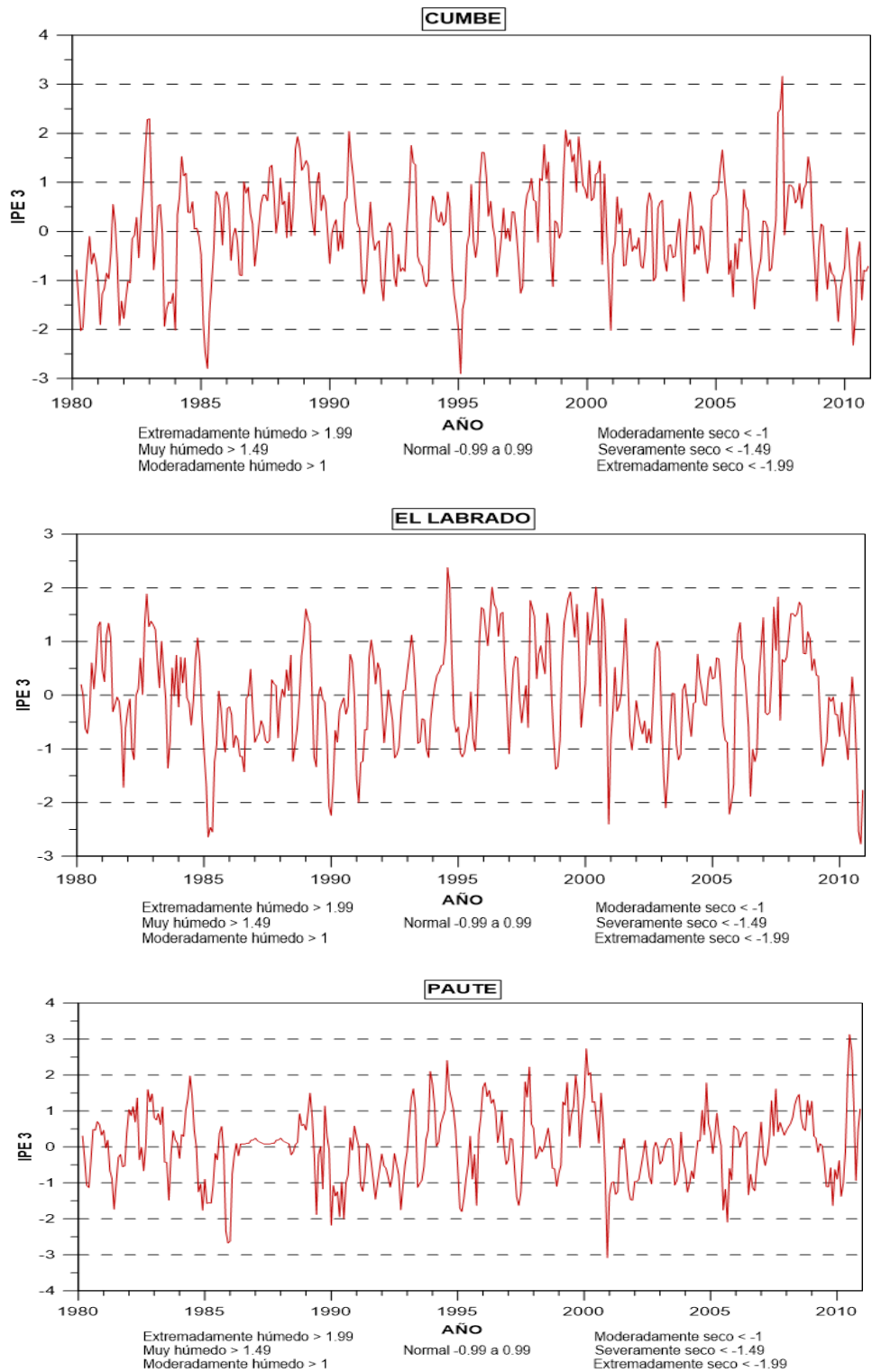
- Cumbe, Ricaurte-Cuenca y Sigsig-Inecel con sequías en los meses de Agosto-Septiembre de 1983.
- El Labrado, Paute y Ricaurte-Cuenca con sequías en Enero de 1990.
- Cumbe, El Labrado y Paute con sequías en Diciembre del 2000.
- Cuenca-Aeropuerto, El Labrado, Paute, Palmas-Azuay y Ricaurte-Cuenca con sequías en el mes de Septiembre del 2005.

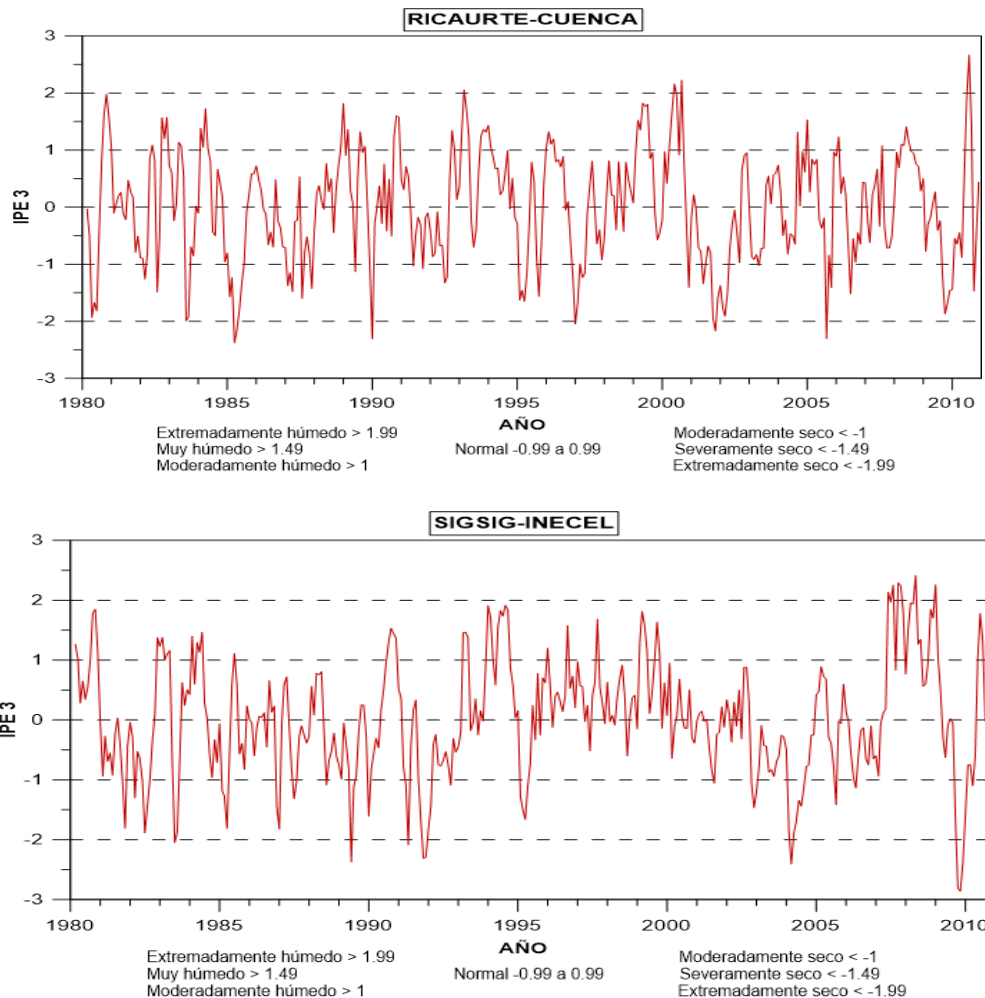
Las estaciones pluviométricas también experimentaron sequías puntuales en los siguientes años:

- Cumbe en los años 1980, 1994 y 2010.
- Cuenca-Aeropuerto en 2001.
- El Labrado en 1990, 1991, 2003 y 2010.
- Palmas-Azuay en 1981, 1992 y 2005.
- Piscícola Chirimichay en 1995.
- Ricaurte-Cuenca en 1995, 1996, 2001 y 2002.
- Sigsig-Inecel en 1989, 1991, 2004 y 2009.



En la Figura 5 se observan las estaciones de Piscícola Chirimichay, Cuenca-Aeropuerto y Palmas-Azuay. Adicionalmente en la Figura 9 se integran las demás estaciones que se utilizaron en el estudio, con el fin de observar y analizar las sequías regionales y puntuales en la escala trimestral que se registraron durante el periodo de estudio.





**Figura 11** Estaciones pluviométricas en la escala temporal de 3 meses con sus eventos de sequía en el periodo 1980-2010.

### Sequías Regionales en la escala temporal de 12 meses

En la escala temporal anual se observó una sequía regional al igual que en la escala temporal de tres meses. Esta sequía se registró únicamente en el mes de Abril de 1985. Es importante recalcar que la duración de estos eventos en ciertas estaciones fue mayor a un mes, aunque particularmente el mes de Abril fue el único que presentó sequías a nivel regional.

Otras estaciones también experimentaron sequías como:

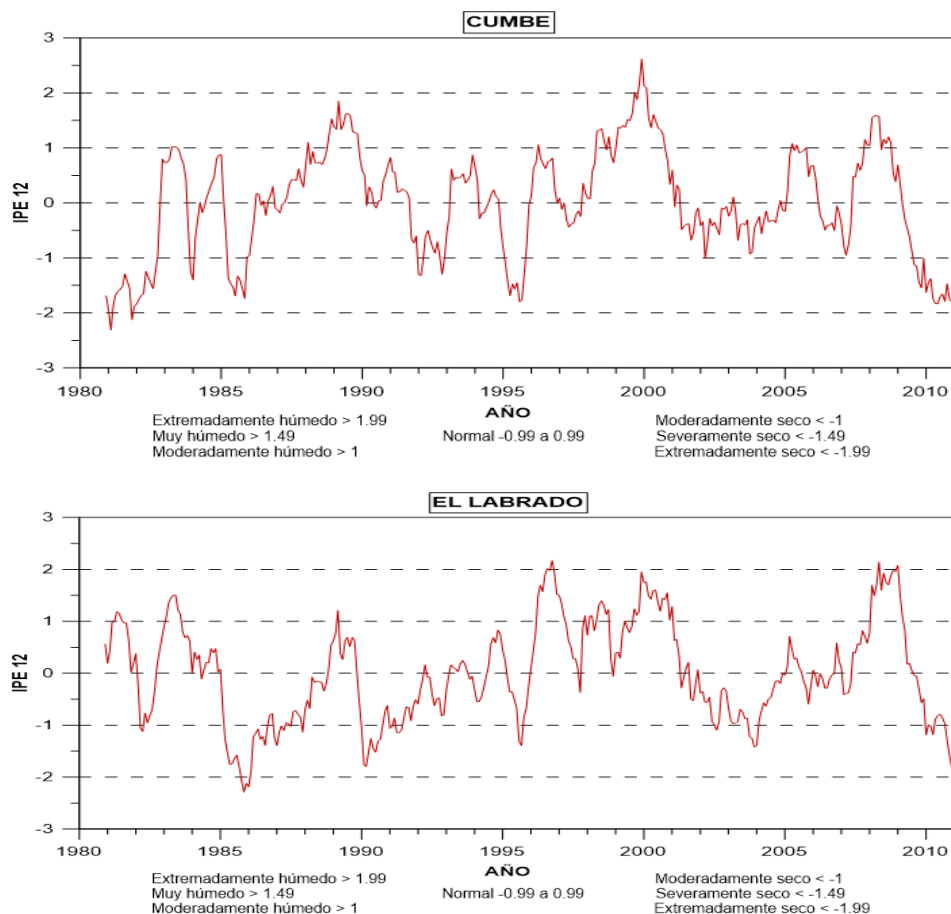
- Cumbe, Palmas-Azuay y Sigsig-Inecel en Noviembre de 1981.
- Cuenca-Aeropuerto, El Labrado, Paute, Ricaurte-Cuenca en Enero de 1986.
- El Labrado, Paute, Piscícola Chirimichay de Julio a Octubre de 1990.

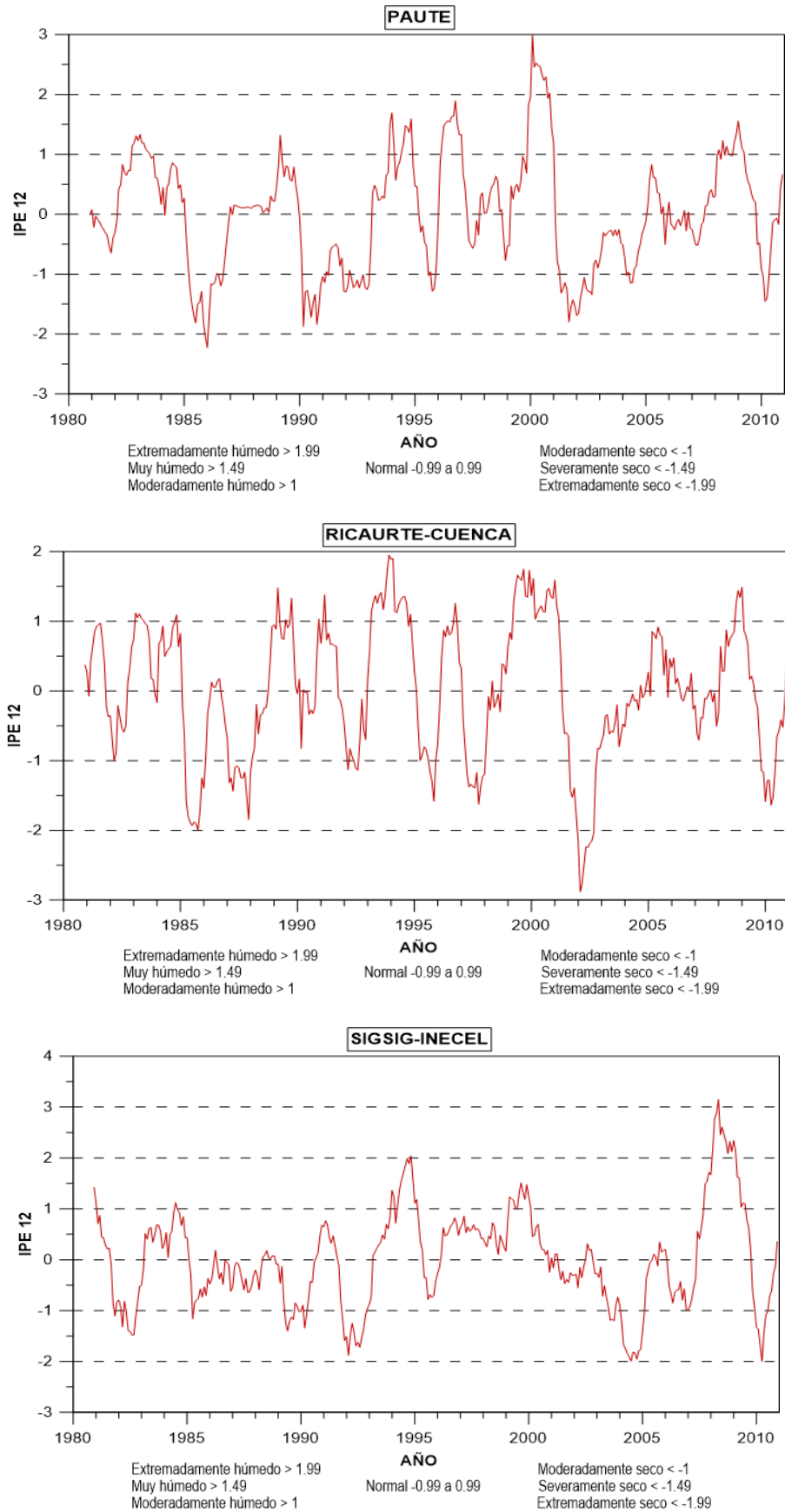
- Cuenca-Aeropuerto, Paute y Ricaurte-Cuenca de Diciembre de 2001 a Septiembre de 2002.

Las demás sequías que se observaron en las estaciones pluviométricas (Figura 6 y 10) fueron puntuales como:

- Cumbe con sequías en el 2009 y 2010.
- Palmas-Azuay con sequías en 1982, 1992, 1995 y 2006.
- Paute en 1986 y 2001.
- Piscícola Chirimichay en 1982, 1991, 1992, 1993, 2003, 2004, 2005 y 2009.
- Ricaurte-Cuenca en 1986, 1987, 1988, 1995, 1997, 2010.
- Sigsig-Inecel en 1982, 1989, 1989, 1990, 1991, 1992, 2003, 2004 y 2010.

En la Figura 6 y 10 se muestran las estaciones de estudio con su IPE en la escala anual, en el cual se puede observar y analizar las sequías regionales y puntuales para esta escala.





**Figura 12** Estaciones pluviométricas en la escala temporal de 12 meses con sus eventos de sequía en el periodo 1980-2010.



#### 4. CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES

Todas las sequías son consecuencia de un déficit de precipitación o de sequía meteorológica, que a su vez puede provocar otros tipos de sequía y de efectos. Los principales tipos de sequías que existen son: Meteorológica, Agrícola, Hidrológica y Socioeconómica. Existen distintos índices para caracterizar las sequías meteorológicas, entre uno de los más importantes, el índice de precipitación estandarizado (IPE), el cual es el más sencillo por solo utilizar datos de precipitación. Este estudio tuvo como objetivo caracterizar las sequías meteorológicas en la cuenca del río Paute aplicando el índice de precipitación estandarizado en diversas escalas temporales. Con este fin, el IPE fue calculado en las ventanas de tiempo de 1, 3, 6, 9, 12 y 24 meses con datos de 8 estaciones pluviométricas ubicadas en la cuenca alta, media y baja del Paute.

Los resultados del índice de precipitación estandarizado (IPE) mostraron que las escalas temporales de 3 y 12 meses poseen una mayor sensibilidad a los cambios de precipitación representando los eventos de sequías a corto y largo plazo. Con los valores del IPE, las sequías meteorológicas se categorizaron en sequías moderadas, severas y extremas. Los resultados expuestos respecto a los distintos parámetros que se determinaron en el trabajo como: duración, número de eventos, frecuencia, persistencia y severidad permiten constituir un insumo relevante para la planificación y adaptación de sequías. Sin embargo en este estudio se destaca que los rasgos más importantes que permitieron distinguir las sequías de manera especial son: la intensidad, asociada al déficit de precipitación y la gravedad de los efectos; la duración, por lo general el tiempo que duran las sequías y la frecuencia de que los eventos de sequías se registren.

La frecuencia y la probabilidad de ocurrencia de eventos de sequías varían según sus categorías. Las sequías moderadas que se registraron en el periodo de estudio (1980-2010) son mayores que las sequías severas y extremas en todas las estaciones pluviométricas, ya que sus valores de IPE que van de -1,00 a -1,49 (sequías moderadas) son más comunes. Por otro lado las sequías severas (-1,50 a -1,99) a pesar de que no se registran tan frecuentemente como las moderadas presentan mayor frecuencia y probabilidad de ocurrencia que las sequías extremas (< -2). Las sequías extremas son los eventos que se registran



en los más largos periodos de tiempo y a su vez aquellos que representan la menor probabilidad de ocurrencia.

Las ocho estaciones que se utilizaron en el estudio fueron Cuenca-Aeropuerto, Cumbe, El Labrado, Palmas-Azuay, Paute, Piscícola Chirimichay, Ricaurte-Cuenca y Sigsig-Inecel. Sin embargo las estaciones de Piscícola Chirimichay, Cuenca-Aeropuerto y Palmas-Azuay que se encuentran ubicadas en la cuenca alta, media y baja respectivamente, fueron escogidas para categorizar y caracterizar las sequías, debido a que demarcan y muestran mejor los eventos de sequía en el periodo de estudio (1980-2010). Al encontrarse en diferentes subcuencas, las estaciones se ven sometidas a diferentes precipitaciones medias anuales (mm) y a su vez regímenes de precipitaciones (UM-BM) que muestran picos de lluvia en distintos meses del año. Estas precipitaciones influyen en los resultados del índice de precipitación estandarizado (IPE) y con ello variaciones en los eventos de sequías, mostrando que estas estaciones presentaron comportamientos diferentes y a su vez diversidad de resultados.

La estación Piscícola Chirimichay presenta la menor correlación, mostrando claramente que las intensidades de los eventos de sequía no son tan altas como se puede observar en otras estaciones, como Cuenca-Aeropuerto y Palmas-Azuay, las cuales muestran varios eventos en todas las categorías de sequías, por lo cual esta estación debería ser utilizada como base en diferentes estudios para determinar mejor su comportamiento. Con respecto al número de eventos de sequías la estación Cuenca-Aeropuerto presentó más similitud con la estación Piscícola Chirimichay, por encontrarse ubicadas en una zona de régimen bimodal, sin embargo Palmas-Azuay en donde su régimen es unimodal los eventos de sequías son más comunes y a la vez diferentes respecto a Piscícola Chirimichay y Cuenca-Aeropuerto.

Las sequías son difíciles de determinar en el tiempo real en que empiezan y terminan, lo cual se comprobó en el estudio ya que todas las estaciones registraron distintos eventos e intensidades de sequías en los diferentes años y principalmente diferencias en sus características dificultando la regionalización de sequías. Sin embargo en el periodo de estudio se puede recalcar la sequía regional del año 1985 que fue la única que se pudo determinar en el estudio. Es



importante recalcar que la sequía de 1985 fue el evento más destacado y a la vez el más largo que se pudo registrar en el periodo de estudio, la cual llegó a durar en la escala trimestral de 3 a 7 meses en las distintas estaciones, mientras que en la escala anual la duración de esta sequía varió significativamente desde 1 hasta 19 meses en las estaciones de estudio. Las demás sequías registradas fueron puntuales, aunque se determinó ciertos eventos que se registraron en las mismas estaciones y años.

Los resultados de este estudio pueden ser utilizados como una herramienta para la actualización de datos e información válida que además de categorizar las sequías, se puedan determinar los impactos no solo ambientales, sino también sociales y económicos, para la aplicación de estrategias de adaptación que alivien tanto a corto como a mediano plazo los impactos relacionados a estas amenazas.

### **Recomendaciones**

Con el presente estudio se pueden determinar ciertos estudios que serían de gran importancia en un futuro:

1. Calcular otros índices de sequías basados en caudales u otras variables meteorológicas para la cuenca del río Paute.
2. Utilizar más índices en la estación pluviométrica de Piscícola Chirimichay y comparar estos valores para determinar qué tan confiables son los resultados y caracterizar correctamente los eventos de sequías.
3. Emplear un número considerable de estaciones que se encuentren distribuidas espacialmente por toda la cuenca para realizar el comportamiento regional de las estaciones a través de mapas.



## 5. REFERENCIAS

- Ataroff M., Sarmiento L. 2003. Diversidad de los Andes de Venezuela. Instituto de Ciencias Ambientales y Ecológicas (ICAE), Universidad de Los Andes. Retrieved from <http://www.ciencias.ula.ve/icae/publicaciones/selvanublada/pdf/ataroff2003.pdf>
- Avilés, A., Célleri, R., Paredes, J., & Solera, A. (2015). Evaluation of Markov Chain Based Drought Forecasts in an Andean Regulated River Basin Using the Skill Scores RPS and GMSS. *Water Resources Management*, 29(6), 1949–1963. <https://doi.org/10.1007/s11269-015-0921-2>
- Avilés, A., Célleri, R., Solera, A., & Paredes, J. (2016). Probabilistic Forecasting of Drought Events Using Markov Chain- and Bayesian Network-Based Models: A Case Study of an Andean Regulated River Basin. *Water*, 8(2), 37. <https://doi.org/10.3390/w8020037>
- Batista, P.-D., & R, D. (2016). Algunas consideraciones sobre el comportamiento de la sequía agrícola en la agricultura de Cuba y el uso de imágenes por satélites en su evaluación. *Cultivos Tropicales*, 37(3), 22–41. <https://doi.org/10.13140/RG.2.1.4591.3843>
- Bisquerra, R. (1989). Introducción conceptual al análisis multivariable. *Barcelona, España*. Retrieved from <https://www.casadellibro.com/libro-introduccion-conceptual-al-analisis-multivariable-2-vols-un-e-nfoque-informatico-con-los-paquetes-spss-z-bmdp-lisrel-y-spad/9788476654422/1484593>
- Campos-Aranda, D. F. (2012). Estimación de la severidad de sequías ambientales mediante registros de lluvia mensual. *Tecnología Y Ciencias Del Agua*, 3(1), 123–130.
- Castillo-Castillo, M., Ibáñez-Castillo, L. A., Valdés, J. B., Arteaga-Ramírez, R., & Vázquez-Peña, M. A. (2017). Análisis de sequías meteorológicas en la cuenca del río Fuerte, México. *Tecnología y Ciencias del Agua*, VIII(1). Retrieved from <http://www.redalyc.org/resumen.oa?id=353549831003>
- Celleri, R., Willems, P., Buytaert, W., & Feyen, J. (2007). Space–time rainfall variability in the Paute basin, Ecuadorian Andes. *Hydrological Processes*, 21(24), 3316–3327. <https://doi.org/10.1002/hyp.6575>





- Cordero, I. (2013). Evaluación de la gestión territorial de la cuenca del río Paute, estrategias y líneas de acción para superarlas, 151.
- Coronel, A. (2013). Sequía: concepto e índices de monitoreo. Propuesta de un nuevo índice. *Facultad de Ciencias Agrarias*.
- Cuesta, F., Bustamante, M., Becerra, M. T., & Peralvo, M. (2012). Panorama Andino de cambio climático: vulnerabilidad y adaptación en los Andes Tropicales. *CONDESAN - SGCAN*, 335.
- Cuesta, F., Muriel, P., Beck, S., Meneses, R., Halloy, S., Salgado, S., ... Becerra, M. (2012). Biodiversidad y cambio climático en los Andes Tropicales. Retrieved from <http://www.comunidadandina.org/Upload/201357161125gloria.pdf>
- Donoso Correa, M. E.. (2002). La cuenca del río Paute: diagnóstico y propuesta de manejo integral. Políticas de desarrollo agropecuario. *Universidad de Cuenca*. Retrieved from <http://repositorio.flacsoandes.edu.ec/bitstream/10469/985/22/TFLACSO-02-2002MECD.pdf>
- Escalante, C., & Reyes, L. (2015). Identificación y análisis de sequías en la Región Hidrológica Número 10, Sinaloa. *Tecnología Y Ciencias Del Agua*, 13(2), 23–43.
- Ferrari, G. (2002). Índice Estandarizado de Precipitación - Hidrometeorología de ETESA. Retrieved April 3, 2017, from <http://www.hidromet.com.pa/spi.php>
- Gastaldi, L. ., & Quaino, O. (2009). Eventos secos y húmedos del régimen de precipitaciones de localidades de la provincia de Santa Fe. *Revista FAVE*. Retrieved from <http://bibliotecavirtual.unl.edu.ar/ojs/index.php/FAVEAgrarias/article/view/1348/2128>
- Guevara, E. (2015). METODOS HIDROLOGICOS PARA EL ANALISIS DE SEQUIAS. *Universidad de Carabobo*. Retrieved from <http://servicio.bc.uc.edu.ve/ingenieria/revista/a1n1/ing5.pdf>
- Guevara, R. (2016). Clasificación integral de la intensidad de la sequía tomando como base el índice de precipitación estandarizado (IPE o SPI por sus siglas en ingles) en el contexto de Nicaragua. Propuesta de umbrales para la medición de la severidad de la afectación por sequía y



- su protocolo general a seguir. Retrieved from [https://www.researchgate.net/publication/299532382\\_Clasificacion\\_integral\\_de\\_la\\_intensidad\\_de\\_la\\_sequia\\_tomando\\_como\\_base\\_el\\_indice\\_de\\_precipitacion\\_estandarizado\\_IPE\\_o\\_SPI\\_por\\_sus\\_siglas\\_en\\_ingles\\_en\\_el\\_contexto\\_de\\_Nicaragua\\_Propuesta\\_de\\_umbrales\\_par](https://www.researchgate.net/publication/299532382_Clasificacion_integral_de_la_intensidad_de_la_sequia_tomando_como_base_el_indice_de_precipitacion_estandarizado_IPE_o_SPI_por_sus_siglas_en_ingles_en_el_contexto_de_Nicaragua_Propuesta_de_umbrales_par)
- Hernández, R. (2008). Caracterización de la sequía meteorológica en los climas Árido, Semiárido y Subhúmedo seco en los Llanos Centro Orientales de Venezuela, para el manejo de los recursos hídricos. *Universidad Nacional Experimental Politécnica de La Fuerza Armada*. Retrieved from [http://www.inameh.gob.ve/web/PDF/Caracterizacion\\_sequia\\_Llanos\\_Centro\\_Orientales\\_Venezuela.pdf](http://www.inameh.gob.ve/web/PDF/Caracterizacion_sequia_Llanos_Centro_Orientales_Venezuela.pdf)
- Herzog, S., Martinez, R., Jorgensen, P., & Tiessen, H. (2012). Cambio climático y Biodiversidad en los Andes Tropicales, 426.
- IGER, I. G. de E. R. (2016). *Estadística Descriptiva* (Segunda). IGER. Retrieved from [https://books.google.es/books?id=QERGDgAAQBAJ&printsec=frontcover&hl=es&source=gbs\\_ge\\_summary\\_r&cad=0#v=onepage&q&f=false](https://books.google.es/books?id=QERGDgAAQBAJ&printsec=frontcover&hl=es&source=gbs_ge_summary_r&cad=0#v=onepage&q&f=false)
- Kanamaru, H., Hiepe, C., & Ramasamy, S. (2013). Adaptación al cambio climático en los Andes tropicales. Retrieved March 10, 2017, from <http://www.fao.org/climatechange/55802/es/>
- Minga, Rodas, D., Serrano, F., Verdugo, F., & Zarate, A. (2012). Diversidad Forestal de la cuenca del río Paute. Retrieved from <https://www.uazuay.edu.ec/HerbarioAzuay/documentos/diforpa.pdf>
- Mishra, A. K., & Desai, V. R. (2005). Drought forecasting using stochastic models. *Stochastic Environmental Research and Risk Assessment*, 19(5), 326–339. <https://doi.org/10.1007/s00477-005-0238-4>
- Mishra, Ashok K., & Singh, V. P. (2010). A review of drought concepts. *Journal of Hydrology*, 391(1), 202–216. <https://doi.org/10.1016/j.jhydrol.2010.07.012>
- Moneo, M. (2004). ¿Por qué es la sequía una cuestión tan importante para los países del Mediterráneo? Retrieved November 20, 2017, from [http://klimat.czn.uj.edu.pl/enid/3\\_\\_Sequ\\_a\\_en\\_el\\_Mediterr\\_neo/\\_importancia\\_de\\_la\\_sequ\\_a\\_1tk.html](http://klimat.czn.uj.edu.pl/enid/3__Sequ_a_en_el_Mediterr_neo/_importancia_de_la_sequ_a_1tk.html)



- Núñez, S., Núñez, L., Podestá, G., & Skansi, M. de los M. (2015). EL ÍNDICE ESTANDARIZADO DE PRECIPITACIÓN COMO HERRAMIENTA PARA LA CARACTERIZACIÓN Y EL MONITOREO DE LA SEQUÍA: UNA PRUEBA DE CONCEPTO. *Servicio Meteorológico Nacional*. Retrieved from <https://www.rsmas.miami.edu/users/agriculture/pubs/meetings/abstracts/SPI-SMN.pdf>
- Olivares, B. (2016). Caracterización de la sequía meteorológica en la red de estaciones agrometeorológicas del Instituto Nacional de Investigaciones Agrícolas (INIA) Venezuela. *Universidad Internacional de Andalucía*. Retrieved from [http://dspace.unia.es/bitstream/handle/10334/3549/0696\\_Olivares.pdf?sequence=3](http://dspace.unia.es/bitstream/handle/10334/3549/0696_Olivares.pdf?sequence=3)
- Olivares, B. O., Cortez, A., Lobo, D., Parra, R. M., Rey B., J. C., & Rodríguez, M. F. (2016). Estudio de la Sequía Meteorológica en Localidades de los Llanos de Venezuela Mediante el Índice de Precipitación Estandarizado. *Acta Nova*, 266.
- Organización meteorológica mundial. (2012). Índice normalizado de precipitación, guía del usuario. Retrieved from [http://www.droughtmanagement.info/literature/WMO\\_standardized\\_precipitation\\_index\\_user\\_guide\\_es\\_2012.pdf](http://www.droughtmanagement.info/literature/WMO_standardized_precipitation_index_user_guide_es_2012.pdf)
- Rivera, J. A. (2014). *Aspectos climatológicos de las sequías meteorológicas en el sur de Sudamérica. Análisis regional y proyecciones futuras* (Text). Facultad de Ciencias Exactas y Naturales. Universidad de Buenos Aires. Retrieved from [http://digital.bl.fcen.uba.ar/gsd1-282/cgi-bin/library.cgi?a=d&c=tesis&d=Tesis\\_5504\\_Rivera](http://digital.bl.fcen.uba.ar/gsd1-282/cgi-bin/library.cgi?a=d&c=tesis&d=Tesis_5504_Rivera)
- Seiler, R. A., Hayes, M., & Bressan, L. (2002). Using the standardized precipitation index for flood risk monitoring. *International Journal of Climatology*, 22(11), 1365–1376. <https://doi.org/10.1002/joc.799>
- Servicio Meteorológico Nacional. (2010). Índice de Precipitación Estandarizado. Retrieved April 3, 2017, from [http://smn1.conagua.gob.mx/index.php?option=com\\_content&view=article&id=257&Itemid=74](http://smn1.conagua.gob.mx/index.php?option=com_content&view=article&id=257&Itemid=74)



- Sierra, E., Fernández, M., & Bustos, C. (1994). CRONOLOGIA DE INUNDACIONES Y SEQUIAS EN EL NORESTE DE LA PROVINCIA DE BUENOS AIRES 1911-89. Retrieved from <http://ri.agro.uba.ar/files/download/revista/facultadagronomia/1993-1994sierraem5.pdf>
- Skansi, M. de los M., Herrera, N., & Veiga, H. (2016). Descripción de índices para el monitoreo de sequía meteorológica implementados por el Centro Regional del Clima para el Sur de América del Sur, 27.
- Tullot, I. F. (2000). *Climatología de España y Portugal*. Universidad de Salamanca.
- Urgilés, M. (2015). Análisis espacio-temporal de precipitaciones e intensidades: obtención de histogramas de diseño en la cuenca alta del río Paute. *Universidad de Cuenca*. Retrieved from <http://dspace.ucuenca.edu.ec/bitstream/123456789/23108/1/tesis.pdf>
- Valiente, O. M. (2001). Sequía: definiciones, tipologías y métodos de cuantificación. *Investigaciones geográficas*, (26), 59–80.
- Vicario, L., García, C. M., Teich, I., Bertoni, J. C., Ravelo, A., & Rodríguez, A. (2015). Caracterización de las sequías meteorológicas en la región central de la Argentina. *Tecnología Y Ciencias Del Agua*, 6(1), 153–165.
- Vicente Serrano, S. M., Beguería, S., Lorenzo-Lacruz, J., Camarero, J. J., López-Moreno, J. I., Azorín-Molina, C., ... Sánchez-Lorenzo, A. (2012). Análisis comparativo de diferentes índices de sequía para aplicaciones ecológicas, agrícolas e hidrológicas. Retrieved from <https://digital.csic.es/handle/10261/62168>
- Vicente-Serrano, S. M., & López-Moreno, J. I. (2005). Hydrological response to different time scales of climatological drought: an evaluation of the Standardized Precipitation Index in a mountainous Mediterranean basin. *Hydrol. Earth Syst. Sci.*, 9(5), 523–533. <https://doi.org/10.5194/hess-9-523-2005>
- Vuille, M. (2013). El cambio climático y los recursos hídricos en los Andes Tropicales. *Banco Interamericano de Desarrollo*. Retrieved from [https://publications.iadb.org/bitstream/handle/11319/5826/SR2012\\_VUILLE\\_FINAL\\_ESP.pdf?sequence=1](https://publications.iadb.org/bitstream/handle/11319/5826/SR2012_VUILLE_FINAL_ESP.pdf?sequence=1)



Wilhite, D. A., & Glantz, M. H. (2009). Understanding: the Drought Phenomenon: The Role of Definitions. *Water International*, 10(3), 111–120. doi:10.1080/02508068508686328

Zhiña, D. (2016). Pronóstico de sequías-caso de estudio en la cuenca del río Machángara. *Universidad de Cuenca*, 55. Retrieved from <http://dspace.ucuenca.edu.ec/bitstream/123456789/23846/1/Tesis.pdf>



## 6. ANEXOS

**Anexo A:** Script implementado en R.

```
# CARGAR LA LIBRERÍA REQUERIDA
```

```
library (SPEI)
```

```
# CALCULO DEL ÍNDICE DE PRECIPITACIÓN ESTANDARIZADO (IPE)
```

```
setwd("C:/Users/bolivar/Desktop/PRUEBA")
```

```
getwd()
```

```
y<-read.csv(file = "Est.cuenca.csv",header = T,sep = ";",dec = ",")
```

```
cuenca <- data.frame()
```

```
for(i in 1:1){
```

```
  png(paste0(i, "Cuenca(1)","png"), height = 4, width = 8, units = "in", res = 500)
```

```
  plot(spi(y[,i+1], 1,fit='max-lik', na.rm =TRUE))
```

```
  dev.off()
```

```
  cuenca[1:372, i] <- data.frame(spi(y[,i+1], 1, na.rm =TRUE)$fitted)
```

```
  write.table(cuenca,"Cuenca1.csv",row.names = F,quote = F,dec = ",")
```

```
}
```

```
#CAMBIAR Y CREAR EL DATA FRAME PARA CADA UNA DE LAS ESTACIONES DE ESTUDIO
```

```
setwd("C:/Users/bolivar/Desktop/PRUEBA")
```

```
getwd()
```

```
y<-read.csv(file = "Est.palmas.csv",header = T,sep = ";",dec = ",")
```

```
palmas <- data.frame()
```

```
for(i in 1:1){
```

```
  png(paste0(i, "Palmas(1)","png"), height = 4, width = 8, units = "in", res = 500)
```

```
  plot(spi(y[,i+1], 1,fit='max-lik', na.rm =TRUE))
```

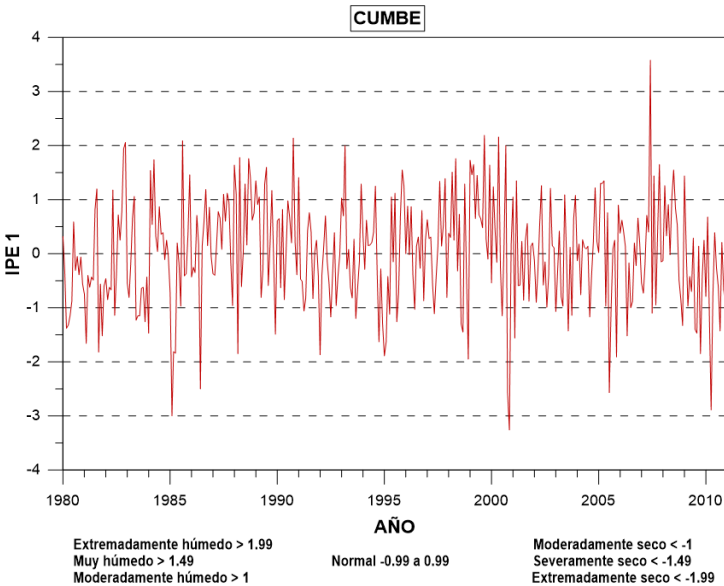
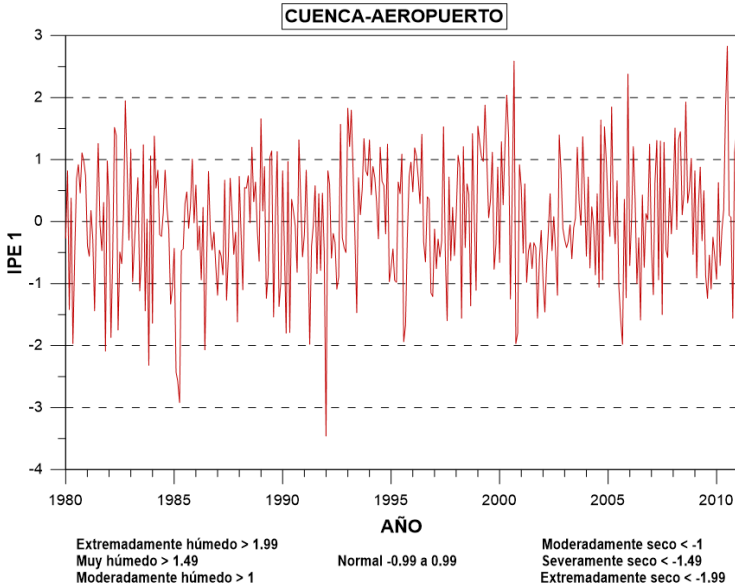
```
  dev.off()
```

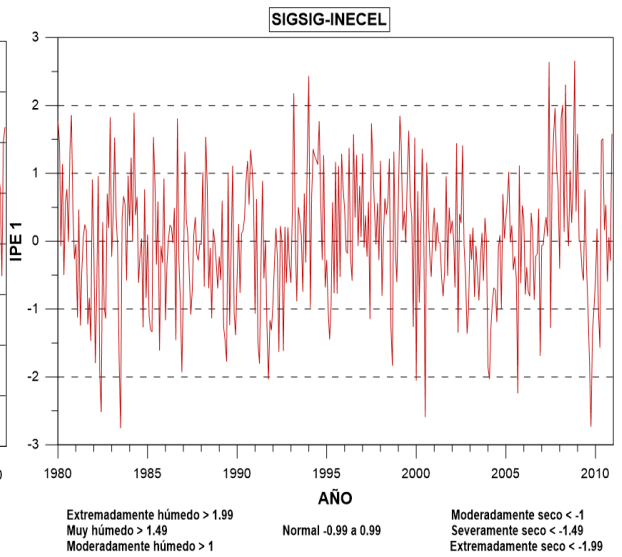
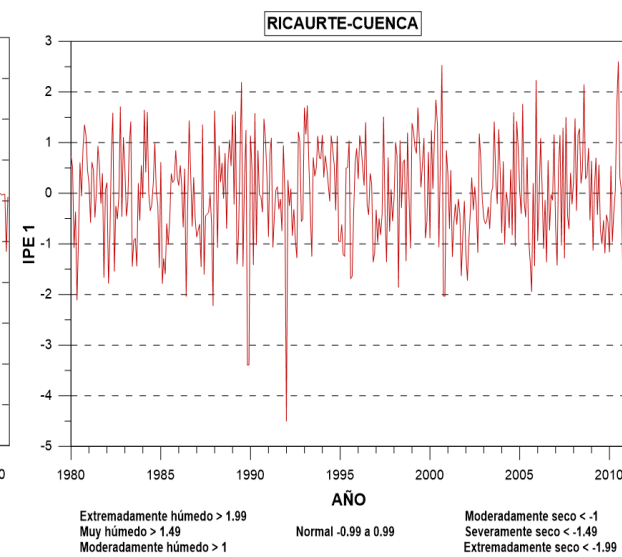
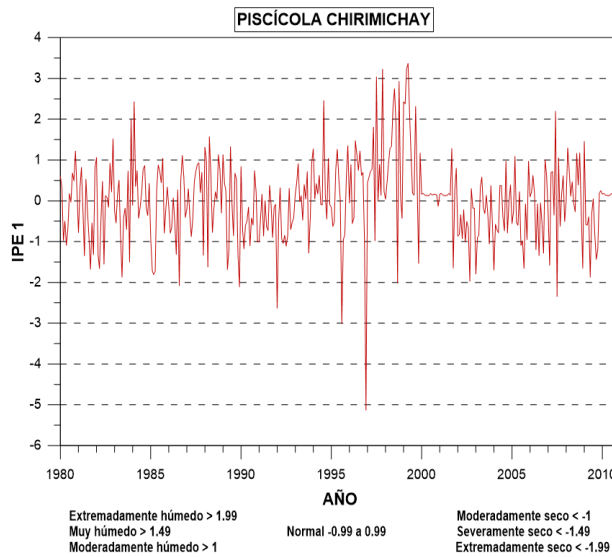
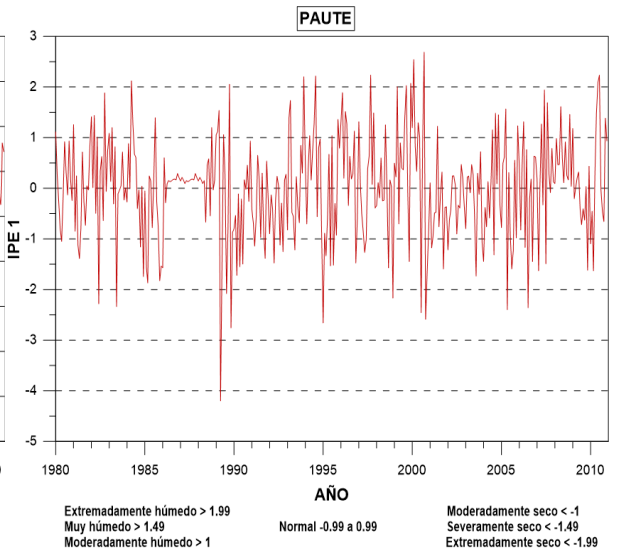
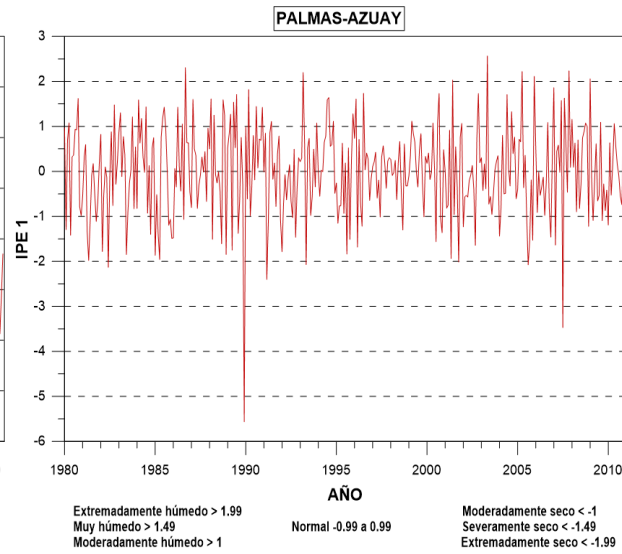
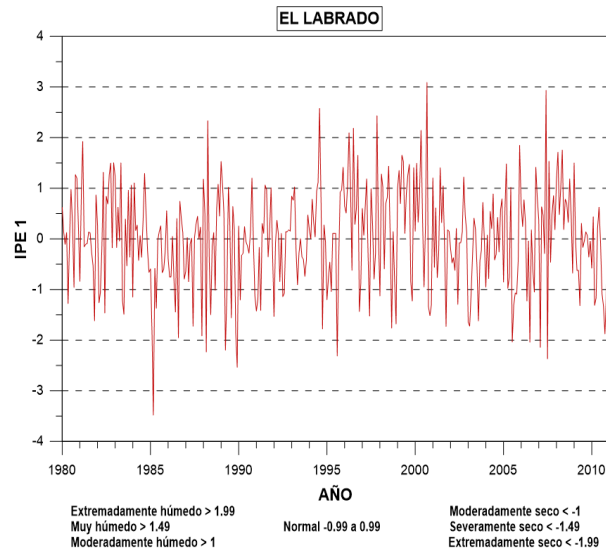
```
palmas[1:372, i] <- data.frame(spi(y[,i+1], 1, na.rm =TRUE)$fitted)
```

```
  write.table(palmas,"Palmas1.csv",row.names = F,quote = F,dec = ",")
```

**Anexo B:** Gráficos del Índice de Precipitación Estandarizado (IPE) en las escalas temporales de 1, 6, 9 y 24 meses.

**ÍNDICE DE PRECIPITACIÓN ESTANDARIZADO 1 (IPE 1)**

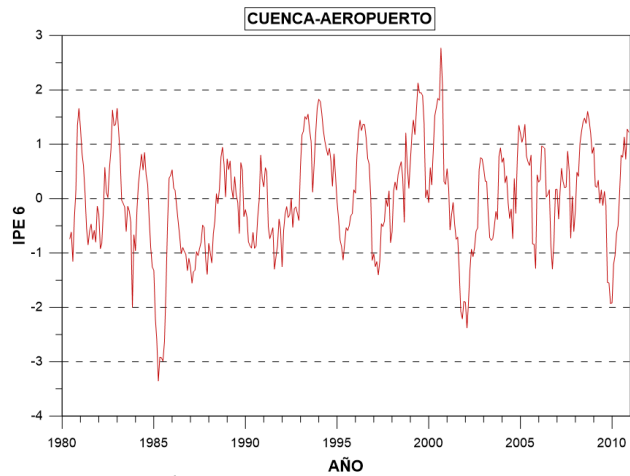








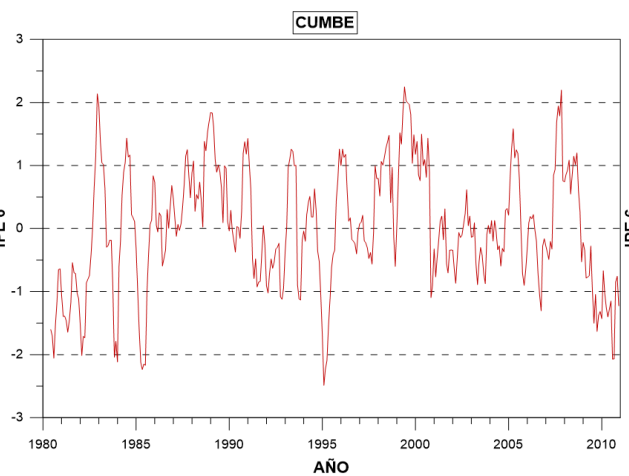
# ÍNDICE DE PRECIPITACIÓN ESTANDARIZADO 6 (IPE 6)



Extremadamente húmedo > 1.99  
Muy húmedo > 1.49  
Moderadamente húmedo > 1

Normal -0.99 a 0.99

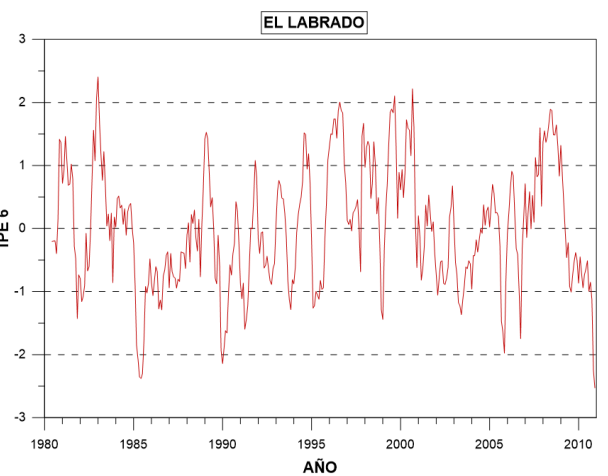
Moderadamente seco < -1  
Severamente seco < -1.49  
Extremadamente seco < -1.99



Extremadamente húmedo > 1.99  
Muy húmedo > 1.49  
Moderadamente húmedo > 1

Normal -0.99 a 0.99

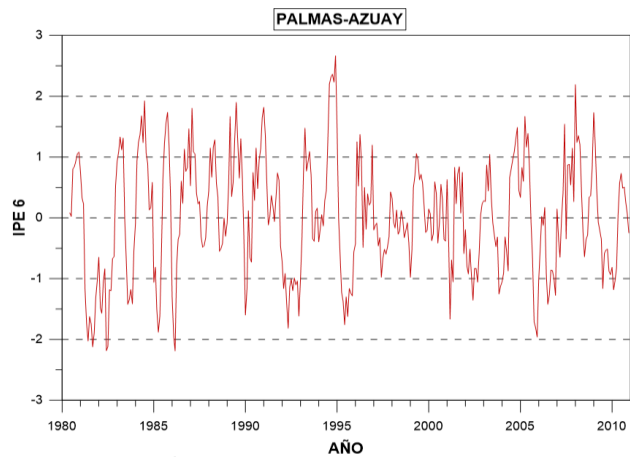
Moderadamente seco < -1  
Severamente seco < -1.49  
Extremadamente seco < -1.99



Extremadamente húmedo > 1.99  
Muy húmedo > 1.49  
Moderadamente húmedo > 1

Normal -0.99 a 0.99

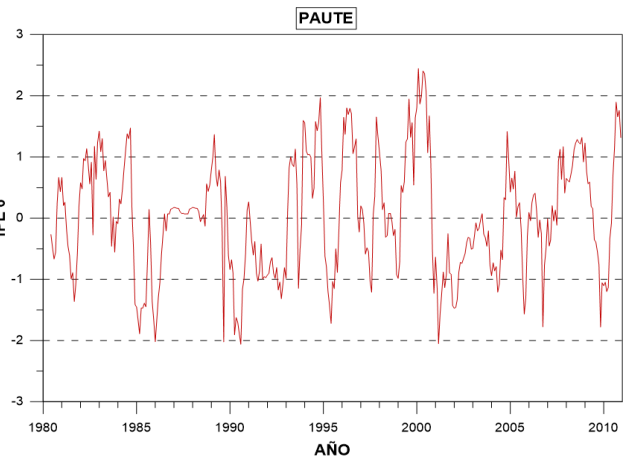
Moderadamente seco < -1  
Severamente seco < -1.49  
Extremadamente seco < -1.99



Extremadamente húmedo > 1.99  
Muy húmedo > 1.49  
Moderadamente húmedo > 1

Normal -0.99 a 0.99

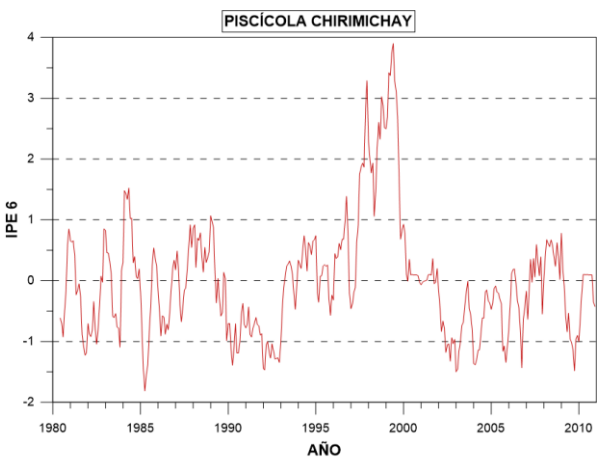
Moderadamente seco < -1  
Severamente seco < -1.49  
Extremadamente seco < -1.99



Extremadamente húmedo > 1.99  
Muy húmedo > 1.49  
Moderadamente húmedo > 1

Normal -0.99 a 0.99

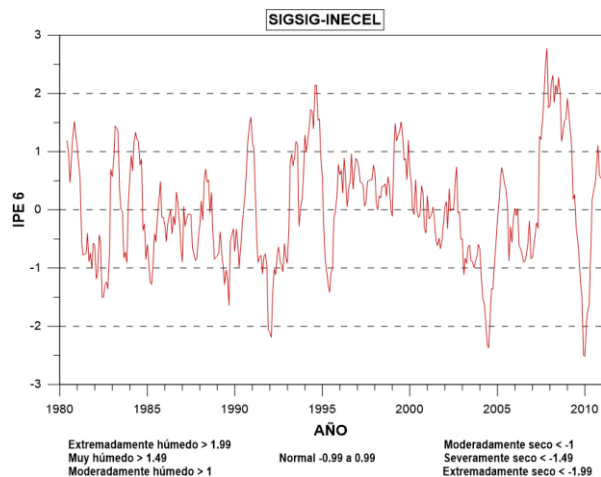
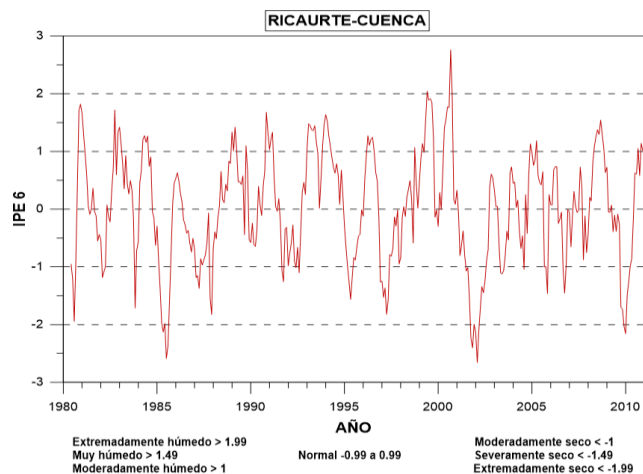
Moderadamente seco < -1  
Severamente seco < -1.49  
Extremadamente seco < -1.99



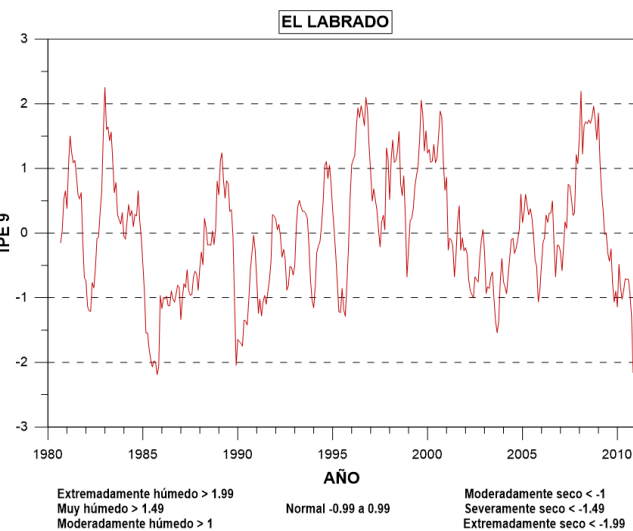
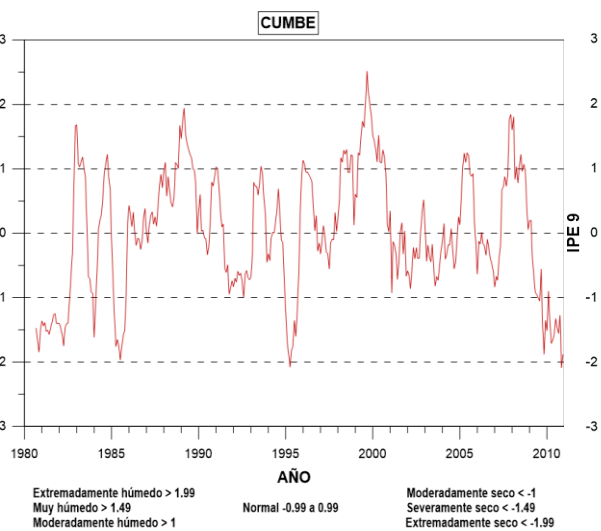
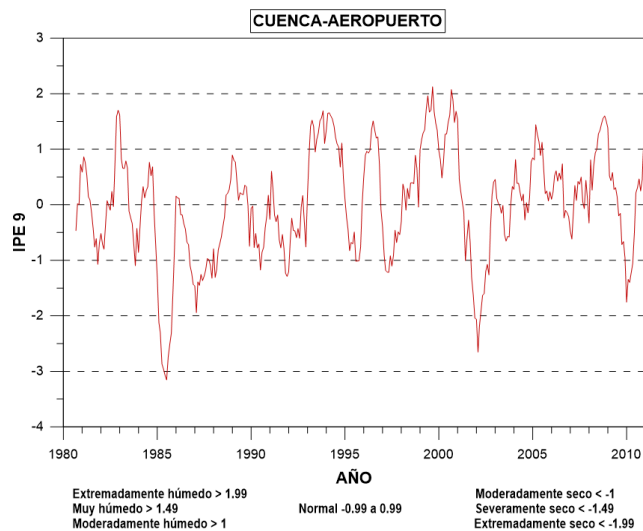
Extremadamente húmedo > 1.99  
Muy húmedo > 1.49  
Moderadamente húmedo > 1

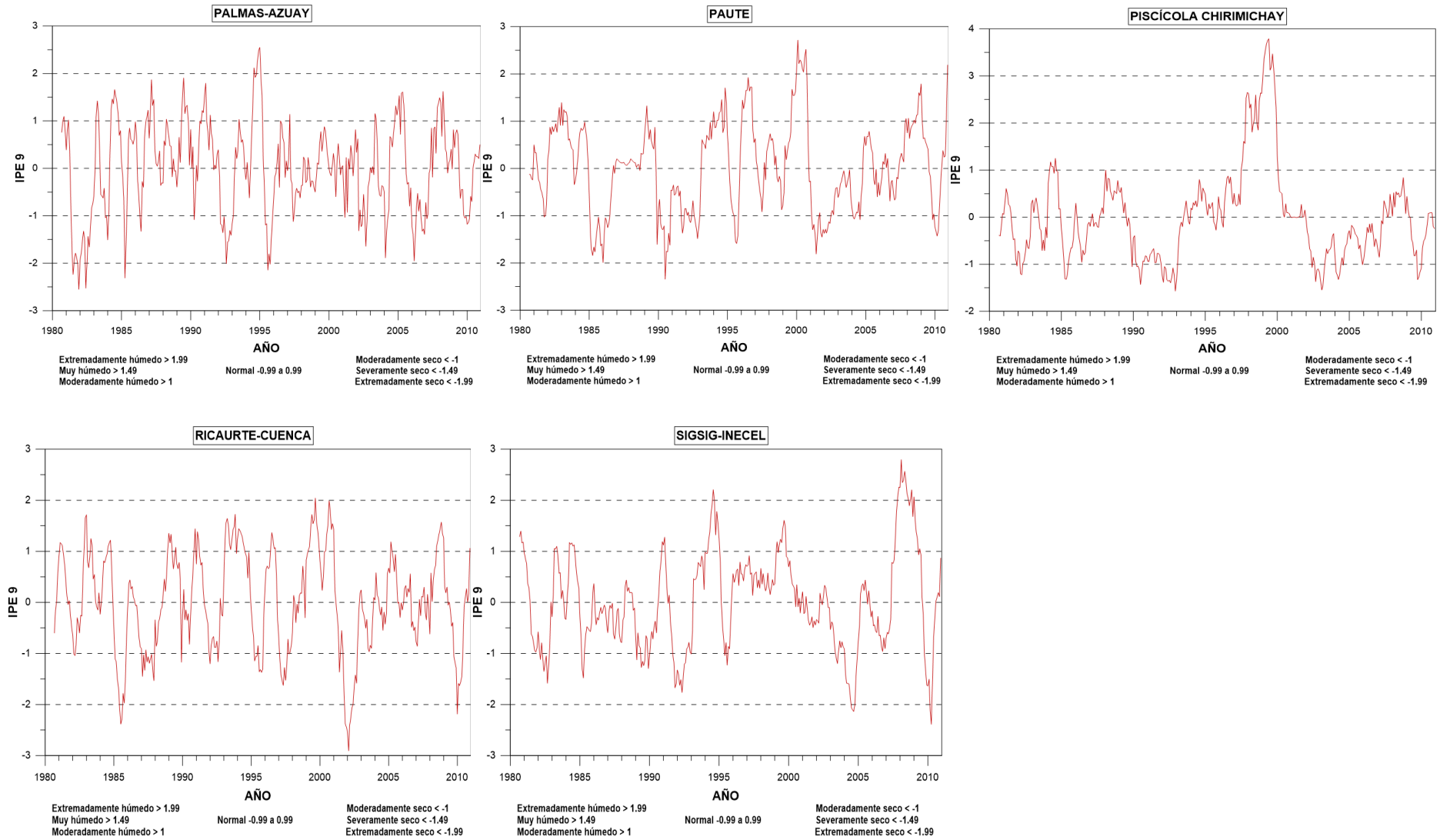
Normal -0.99 a 0.99

Moderadamente seco < -1  
Severamente seco < -1.49  
Extremadamente seco < -1.99



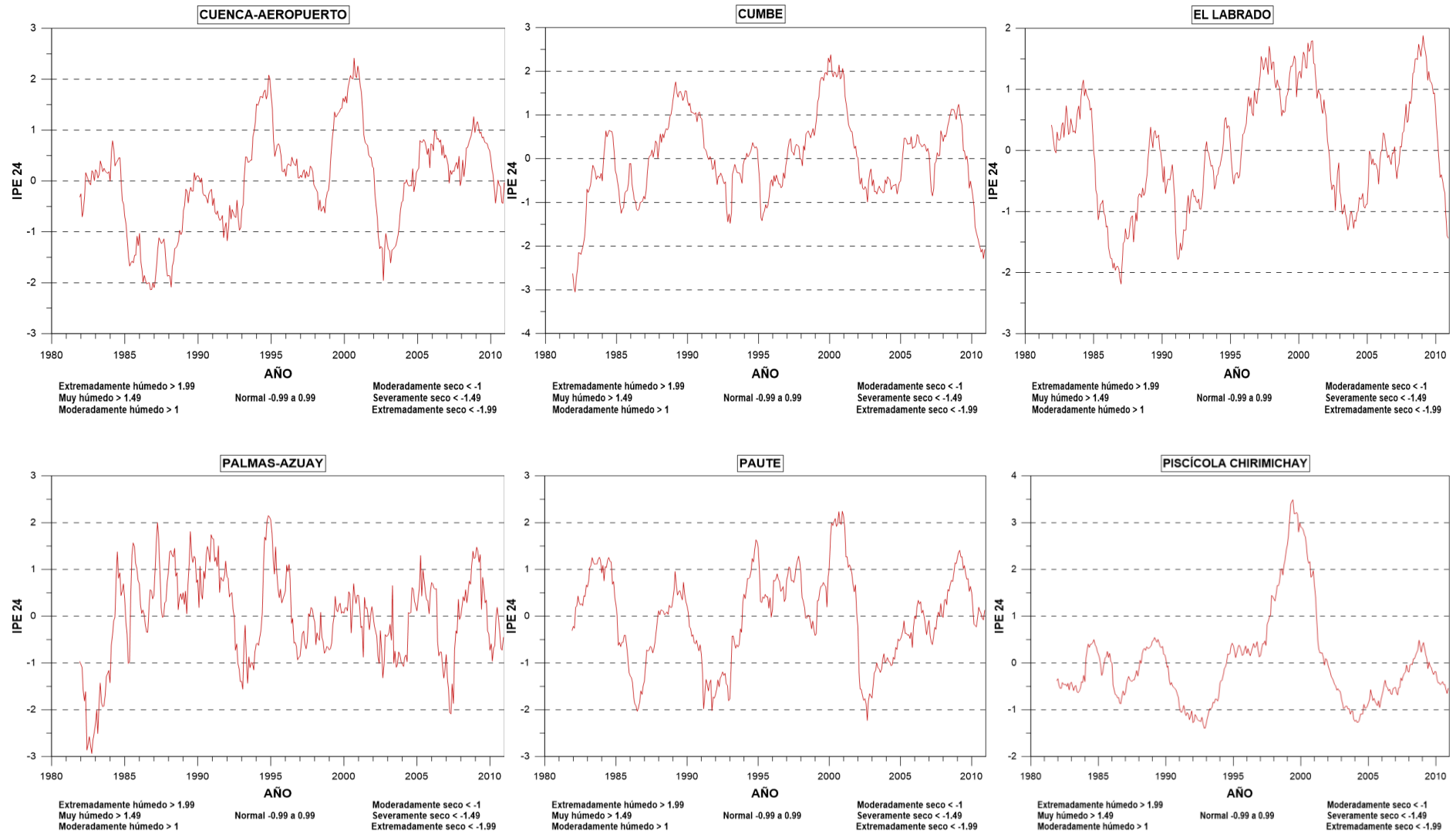
### ÍNDICE DE PRECIPITACIÓN ESTANDARIZADO 9 (IPE 9)

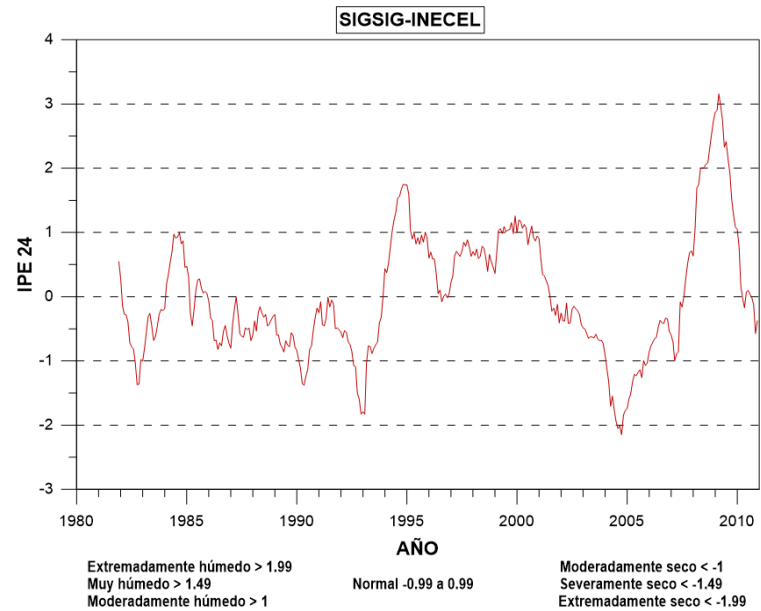
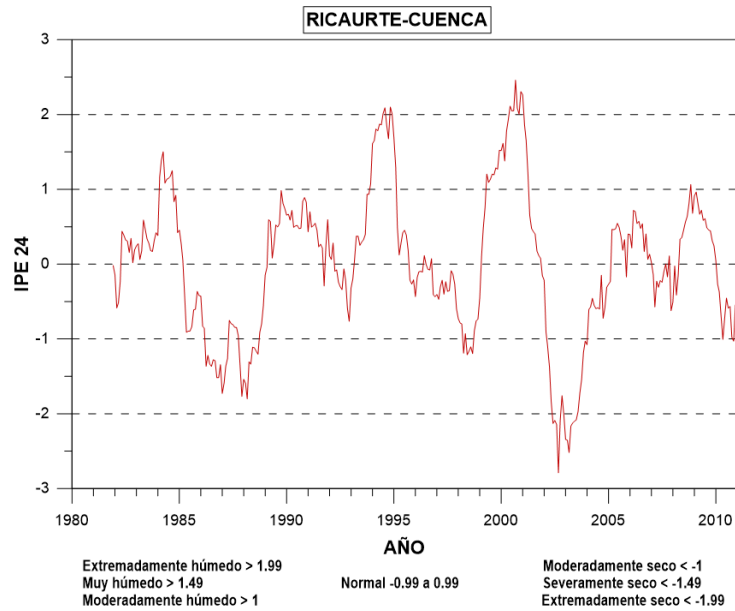






# ÍNDICE DE PRECIPITACIÓN ESTANDARIZADO 24 (IPE 24)

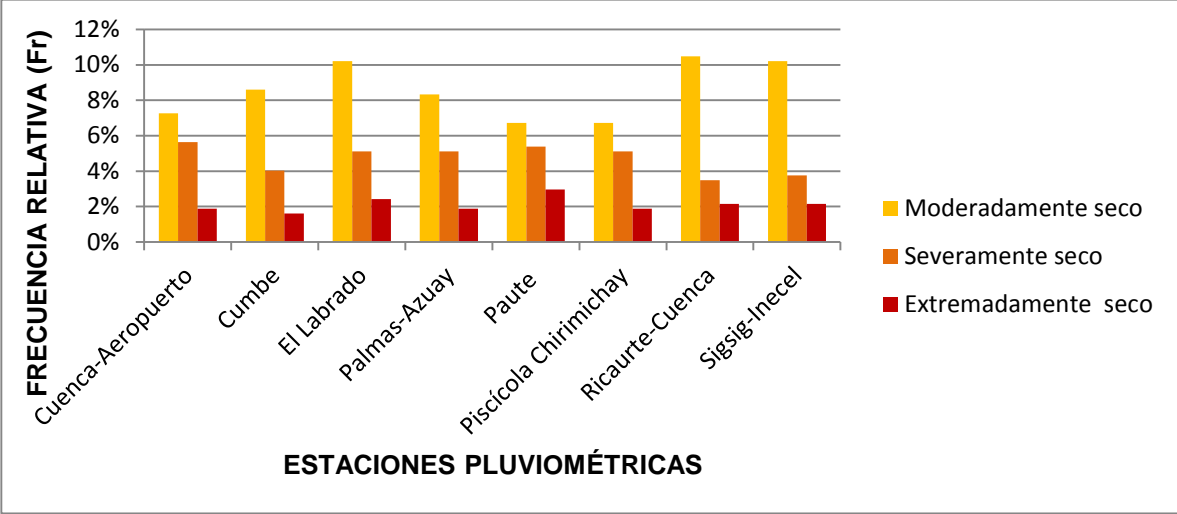




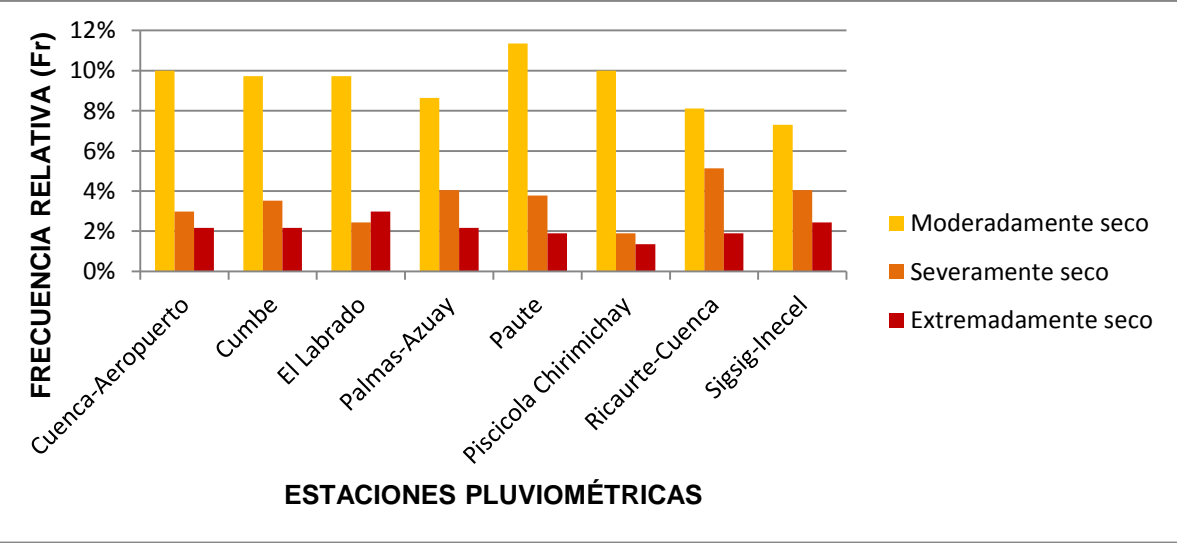


**Anexo C:** Frecuencias relativas en las escalas temporales de 1, 3, 6, 9, 12 y 24 meses en las estaciones de estudio.

Frecuencia relativa en la escala temporal de 1 mes

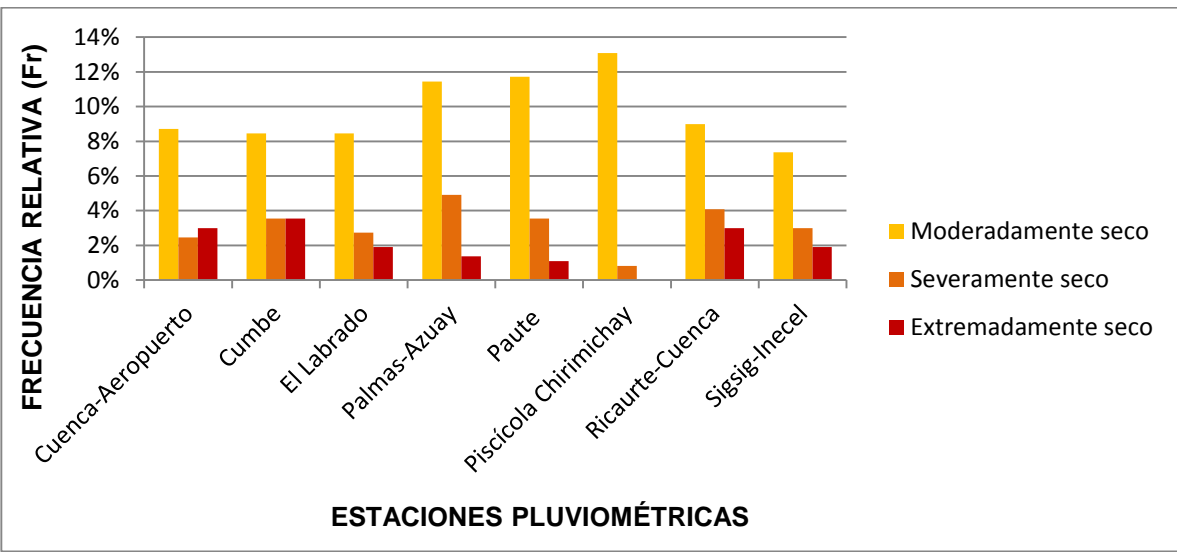


Frecuencia relativa en la escala temporal de 3 meses

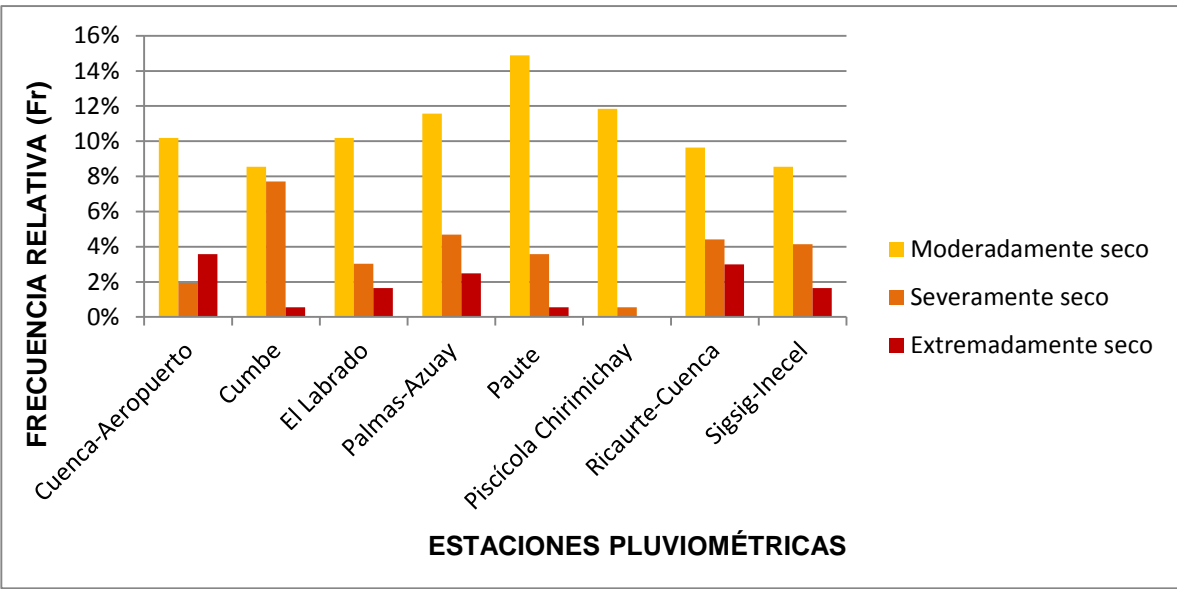




Frecuencia relativa en la escala temporal de 6 meses

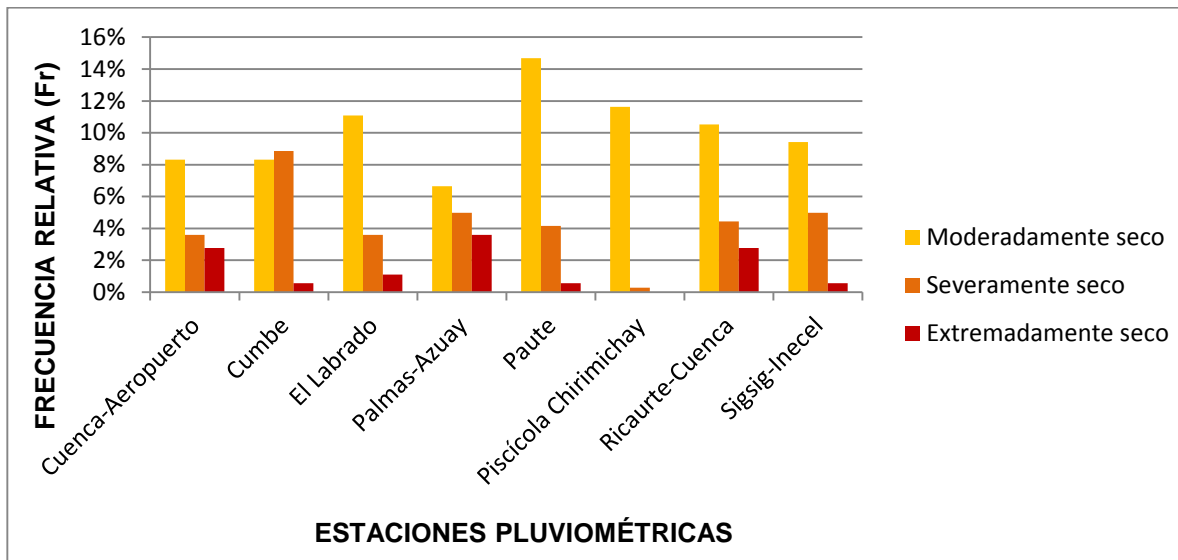


Frecuencia relativa en la escala temporal de 9 meses

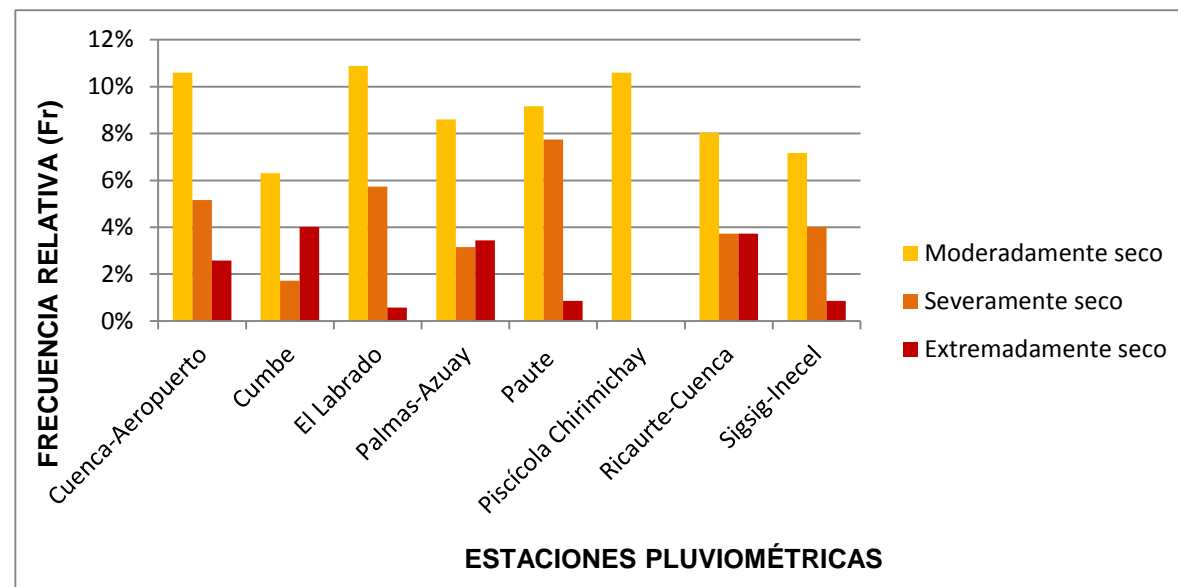




Frecuencia relativa en la escala temporal de 12 meses



Frecuencia relativa en la escala temporal de 24 meses







**Anexo D:** Tablas de las frecuencias absolutas y relativas (meses) en la escala trimestral y anual.

Frecuencias absolutas y relativas (meses) en la escala trimestral

		Cuenca-Aeropuerto		Palmas-Azuay		Piscícola Chirimichay	
<b>SEVERIDAD</b>		<b>FRECUENCIA (Número y porcentaje de meses)</b>					
		<b>Fa</b>	<b>Fr</b>	<b>Fa</b>	<b>Fr</b>	<b>Fa</b>	<b>Fr</b>
-1,00 a -1,49	Sequía Moderada	37	10.00%	32	8.65%	37	10.00%
-1,5 a -1,99	Sequía Severa	11	2.97%	15	4.05%	7	1.89%
-2 y menos	Sequía Extrema	8	2.16%	8	2.16%	5	1.35%

Frecuencias absolutas y relativas (meses) en la escala anual

		Cuenca-Aeropuerto		Palmas-Azuay		Piscícola Chirimichay	
<b>SEVERIDAD</b>		<b>FRECUENCIA (Número y porcentaje de meses)</b>					
		<b>Fa</b>	<b>Fr</b>	<b>Fa</b>	<b>Fr</b>	<b>Fa</b>	<b>Fr</b>
-1,00 a -1,49	Sequía Moderada	30	8.31%	24	6.65%	42	11.63%
-1,5 a -1,99	Sequía Severa	13	3.60%	18	4.99%	1	0.28%
-2 y menos	Sequía Extrema	10	2.77%	13	3.60%	0	0.00%



**Anexo E:** Matrices de correlación de las 8 estaciones pluviométricas en las escalas temporales de 1, 6, 9 y 24 meses.

Matriz de correlación de la escala temporal 1

MATRIZ DE CORRELACIÓN								
Estaciones pluviométricas	Cuenca-Aeropuerto	Cumbe	El Labrado	Palmas-Azuay	Paute	Piscícola Chirimichay	Ricaurte-Cuenca	Sigsig-Inecel
Cuenca-Aeropuerto	1	0.55	0.58	0.38	0.53	0.52	0.90	0.38
Cumbe		1	0.61	0.40	0.50	0.47	0.55	0.40
El Labrado			1	0.50	0.56	0.64	0.59	0.43
Palmas-Azuay				1	0.55	0.43	0.39	0.48
Paute					1	0.43	0.54	0.48
Piscícola Chirimichay						1	0.50	0.42
Ricaurte-Cuenca							1	0.38
Sigsig-Inecel								1

Matriz de correlación de la escala temporal 6

MATRIZ DE CORRELACIÓN								
Estaciones pluviométricas	Cuenca-Aeropuerto	Cumbe	El Labrado	Palmas-Azuay	Paute	Piscícola Chirimichay	Ricaurte-Cuenca	Sigsig-Inecel
Cuenca-Aeropuerto	1	0.51	0.57	0.26	0.64	0.40	0.92	0.45
Cumbe		1	0.56	0.40	0.47	0.47	0.53	0.42
El Labrado			1	0.37	0.60	0.53	0.54	0.47
Palmas-Azuay				1	0.46	0.33	0.32	0.51
Paute					1	0.45	0.59	0.54
Piscícola Chirimichay						1	0.36	0.48
Ricaurte-Cuenca							1	0.44
Sigsig-Inecel								1



Matriz de correlación de la escala temporal 9

MATRIZ DE CORRELACIÓN								
Estaciones pluviométricas	Cuenca-Aeropuerto	Cumbe	El Labrado	Palmas-Azuay	Paute	Piscícola Chirimichay	Ricaurte-Cuenca	Sigsig-Inecel
Cuenca-Aeropuerto	1	0.53	0.63	0.22	0.69	0.40	0.91	0.47
Cumbe		1	0.56	0.40	0.49	0.50	0.55	0.44
El Labrado			1	0.24	0.68	0.54	0.57	0.54
Palmas-Azuay				1	0.35	0.26	0.32	0.49
Paute					1	0.44	0.64	0.53
Piscícola Chirimichay						1	0.35	0.51
Ricaurte-Cuenca							1	0.47
Sigsig-Inecel								1

Matriz de correlación de la escala temporal 24

MATRIZ DE CORRELACIÓN								
Estaciones pluviométricas	Cuenca-Aeropuerto	Cumbe	El Labrado	Palmas-Azuay	Paute	Piscícola Chirimichay	Ricaurte-Cuenca	Sigsig-Inecel
Cuenca-Aeropuerto	1	0.44	0.71	0	0.74	0.44	0.85	0.47
Cumbe		1	0.47	0.42	0.44	0.60	0.49	0.33
El Labrado			1	0	0.81	0.66	0.54	0.64
Palmas-Azuay				1	0	0.10	0.20	0.30
Paute					1	0.59	0.66	0.59
Piscícola Chirimichay						1	0.35	0.57
Ricaurte-Cuenca							1	0.39
Sigsig-Inecel								1

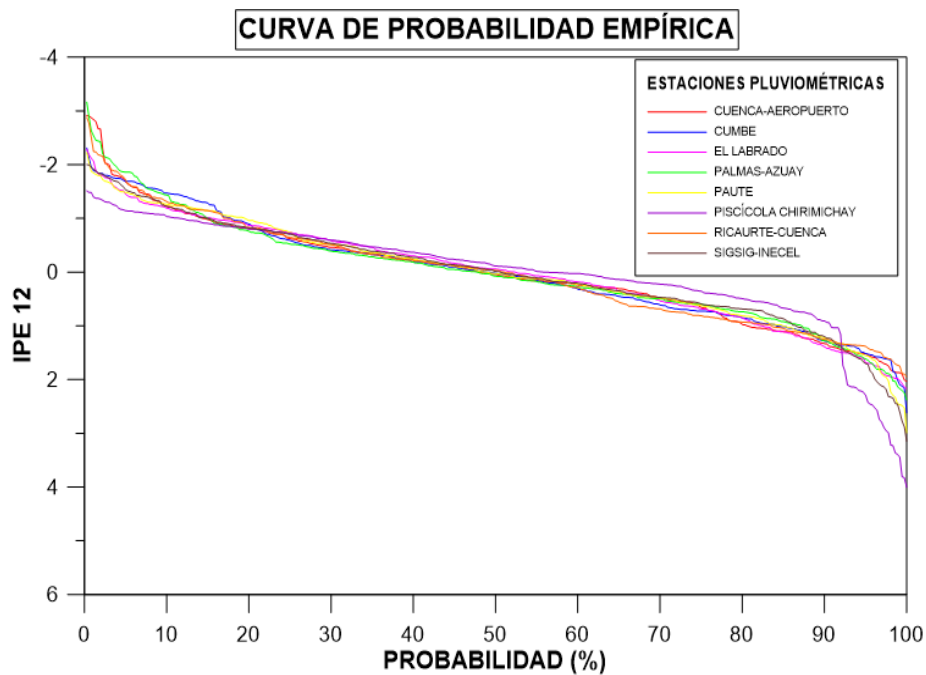


Anexo F: P-Valor de las correlaciones en la escala temporal de 3 meses

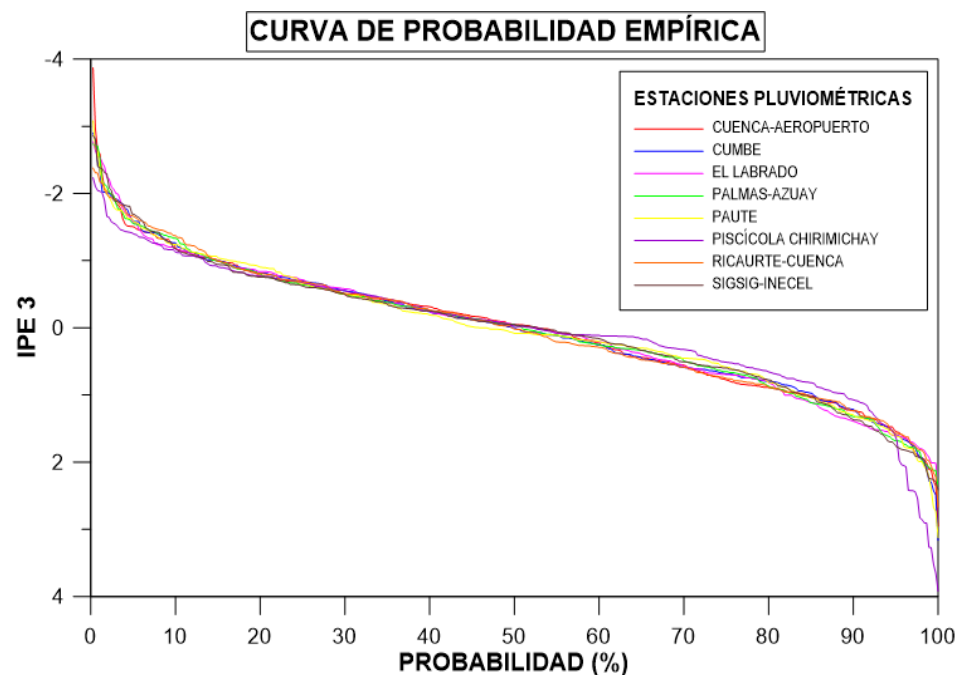
Variables	P-VALOR							
	Cuenca-Aeropuerto	Cumbe	El Labrado	Palmas-Azuay	Paute	Piscícola Chirimichay	Ricaurte-Cuenca	Sigsig-Inecel
Cuenca-Aeropuerto	0	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000
Cumbe	< 0.0001	0	< 0.0001	< 0.0001	< 0.0001	< 0.0001	< 0.0001	< 0.0001
El Labrado	< 0.0001	< 0.0001	0	< 0.0001	< 0.0001	< 0.0001	< 0.0001	< 0.0001
Palmas-Azuay	< 0.0001	< 0.0001	< 0.0001	0	< 0.0001	< 0.0001	< 0.0001	< 0.0001
Paute	< 0.0001	< 0.0001	< 0.0001	< 0.0001	0	< 0.0001	< 0.0001	< 0.0001
Piscícola Chirimichay	< 0.0001	< 0.0001	< 0.0001	< 0.0001	< 0.0001	0	< 0.0001	< 0.0001
Ricaurte-Cuenca	< 0.0001	< 0.0001	< 0.0001	< 0.0001	< 0.0001	< 0.0001	0	< 0.0001
Sigsig-Inecel	< 0.0001	< 0.0001	< 0.0001	< 0.0001	< 0.0001	< 0.0001	< 0.0001	0



**Anexo G:** Curvas de probabilidades empíricas de todas las estaciones de estudio en la escala trimestral y anual.



Curva de probabilidad empírica en la escala trimestral



Curva de probabilidad empírica en la escala anual