

UNIVERSIDAD DE COSTA RICA
FACULTAD DE CIENCIAS SOCIALES
ESCUELA DE GEOGRAFÍA

**Análisis comparativo de la sequía y su relación con la teleconexión
en cuencas tropicales de Costa Rica, Colombia y Ecuador, en el
período 1975-2014.**

Tesis para optar por el grado de
Licenciatura en geografía

Presentado por:
Eddy Umaña Leal B26774

Ciudad Universitaria Rodrigo Facio, San José, Costa Rica
2020

Tribunal Examinador

Director de Tesis

Dr. Christian Birkel

Lector Evaluador

Dr. Rafael Arce Mesén

Lector Evaluador

Dr. Patricio Javier Crespo

Lector Examinador

DEA. Pascal Olivier Girot

Lector Examinador

Dr. Víctor Cortés Granados

Agradecimientos

Primero agradezco a Dios por la oportunidad de vivir una etapa maravillosa en la Universidad de Costa Rica.

Agradezco profundamente a mis padres Eduardo Umaña y Lourdes Leal por su amor incondicional, por estar siempre apoyándome en todo y por brindarme la oportunidad de estudiar.

A mi hermano Eder, por las palabras de apoyo y compañía.

A los miembros del Comité Asesor, en especial a Christian Birkel por confiar en mi persona para la realización de esta tesis y por toda la colaboración brindada, y a Patricio Crespo de la Universidad de Cuenca por sus valiosos aportes.

A TropiSeca por las facilidades brindadas para hacer posible el desarrollo de investigación.

A los colegas del Observatorio del Agua y Cambio Global (OACG), por la compañía y solidaridad durante el proceso.

A todos mis compañeros de la universidad y amigos por sus muestras de cariño, palabras de motivación y apoyo durante mi estancia en esta grandiosa institución.

A la Escuela de Geografía y a la Universidad de Costa Rica por todas las enseñanzas, colaboraciones y oportunidades.

Índice

Índice de Figuras	v
Índice de Tablas	viii
Abreviaturas Utilizadas	x
Resumen	xi
Capítulo 1. Aspectos Generales	1
1.1 Introducción	1
1.2. Delimitación Espacial.....	2
1.3. Delimitación Temporal.....	7
1.4. Problema de Investigación.....	7
1.5. Justificación	7
1.6. Antecedentes	9
1.7. Objetivos.....	13
1.8. Marco Conceptual	13
1.9. Marco Metodológico	23
Capítulo II. Caracterización de las sequías.	26
2.1. Escala Trimestral (Sequía agrícola)	26
2.2. Escala anual (Sequía hidrológica)	27
2.3. Cuenca Tempisque-Bebedero	28
2.4. Cuenca San Juan	36
2.5. Cuenca Lengupá.....	39
2.6. Cuenca Paute.....	47
2.5. Cuenca Jubones.....	55
2.6. Probabilidad de ocurrencia anual de las sequías.....	58
Capítulo III. Influencia de la teleconexión en las sequías.	62
3.1. Escala trimestral (Sequía agrícola).....	62

3.2. Escala anual (Sequía hidrológica)	67
3.4. Variabilidad espacial de la relación SPI y la teleconexión en la cuenca Paute	72
3.5. Análisis de las series temporales del SPI-12 y los índices de teleconexión de mayor importancia según la regresión RF.	76
Capítulo IV. Comparación del comportamiento de la sequía en las cuencas tropicales de Costa Rica, Colombia y Ecuador, y su relación con la teleconexión	82
4.1. Frecuencia y duración total de las sequías.....	82
4.2. Principales eventos de sequía de acuerdo a la magnitud.....	85
4.3. Relación de las sequías con la teleconexión.	86
Conclusiones	90
Recomendaciones	93
Bibliografía	95
Anexos.....	105

Índice de Figuras

Figura 1. Mapa de ubicación de las cuencas en estudio.	3
Figura 2. Estructura del marco conceptual.	22
Figura 3. Índice estandarizado de precipitación a escala temporal de 3 meses de la estación Corralillo, cuenca Tempisque-Bebedero, Costa Rica.	29
Figura 4. Índice estandarizado de precipitación a escala temporal de 3 meses de la estación Gramita, cuenca Tempisque-Bebedero, Costa Rica.	30
Figura 5. Índice estandarizado de precipitación a escala temporal de 3 meses de la estación La Guinea, cuenca Tempisque-Bebedero, Costa Rica.	31
Figura 6. Índice estandarizado de precipitación a escala temporal de 12 meses de la estación Corralillo, cuenca Tempisque-Bebedero, Costa Rica.	33
Figura 7. Índice estandarizado de precipitación a escala temporal de 12 meses de la estación Gramita, cuenca Tempisque-Bebedero, Costa Rica.	34
Figura 8. Índice estandarizado de precipitación a escala temporal de 12 meses de la estación La Guinea, cuenca Tempisque-Bebedero, Costa Rica.	34
Figura 9. Índice estandarizado de precipitación a escala temporal de 3 meses de la estación Pueblo Rico, cuenca San Juan, Colombia.	37
Figura 10. Índice estandarizado de precipitación a escala temporal de 12 meses de la estación Pueblo Rico, cuenca San Juan, Colombia.	38
Figura 11. Índice estandarizado de precipitación a escala temporal de 3 meses de la estación Rondón, cuenca Lengupá, Colombia.	40
Figura 12. Índice estandarizado de precipitación a escala temporal de 3 meses de la estación Cedros, cuenca Lengupá, Colombia.	41
Figura 13. Índice estandarizado de precipitación a escala temporal de 3 meses de la estación Piedra Campana, cuenca Lengupá, Colombia.	42
Figura 14. Índice estandarizado de precipitación a escala temporal de 12 meses de la estación Rondón, cuenca Lengupá, Colombia.	44
Figura 15. Índice estandarizado de precipitación a escala temporal de 12 meses de la estación Cedros, cuenca Lengupá, Colombia.	45
Figura 16. Índice estandarizado de precipitación a escala temporal de 12 meses de la estación Piedra Campana, cuenca Lengupá, Colombia.	46

Figura 17. Índice estandarizado de precipitación a escala temporal de 3 meses de la estación El Labrado, cuenca Paute, Ecuador.	48
Figura 18. SPI-3 Índice estandarizado de precipitación a escala temporal de 3 meses de la estación Gualaceo, cuenca Paute, Ecuador.	49
Figura 19. Índice estandarizado de precipitación a escala temporal de 3 meses de la estación Río Mazar Rivera, cuenca Paute, Ecuador.	50
Figura 20. Índice estandarizado de precipitación a escala temporal de 12 meses de la estación El Labrado, cuenca Paute, Ecuador.	52
Figura 21. Índice estandarizado de precipitación a escala temporal de 12 meses de la estación Gualaceo, cuenca Paute, Ecuador.	52
Figura 22. Índice estandarizado de precipitación a escala temporal de 12 meses de la estación Río Mazar Rivera, cuenca Paute, Ecuador.....	53
Figura 23. Índice estandarizado de precipitación a escala temporal de 3 meses de la estación Ushcurrumi, cuenca Jubones, Ecuador.	55
Figura 24. Índice estandarizado de precipitación a escala temporal de 12 meses de la estación Ushcurrumi, cuenca Jubones, Ecuador.	57
Figura 25. Probabilidad de ocurrencia anual de sequía según el índice estandarizado de precipitación a escala temporal de 3 meses.	59
Figura 26. Probabilidad de ocurrencia anual de sequía según el índice estandarizado de precipitación a escala temporal de 12 meses.	61
Figura 27. Mapa de las estaciones con el mayor coeficiente R^2 de la relación entre el SPI-3 y los índices de teleconexión de acuerdo con el modelo de regresión Random Forest.	65
Figura 28. Mapa de las estaciones con el mayor coeficiente R^2 de la relación entre el SPI-3 y los índices de teleconexión de acuerdo con el modelo de regresión lineal múltiple.	67
Figura 29. Mapa de las estaciones con el mayor coeficiente R^2 de la relación entre el SPI-12 y los índices de teleconexión de acuerdo con el modelo de regresión Random Forest.	70
Figura 30. Mapa de las estaciones con el mayor coeficiente R^2 de la relación entre el SPI-12 y los índices de teleconexión de acuerdo con el modelo de regresión lineal múltiple.	71

Figura 31. Mapa de coeficientes R^2 de la relación entre SPI-3 y los índices de teleconexión en las estaciones de la cuenca Paute según el modelo de regresión lineal múltiple.	73
Figura 32. Mapa de coeficientes R^2 de la relación entre SPI-12 y los índices de teleconexión en las estaciones de la cuenca Paute según el modelo de regresión lineal múltiple.	74
Figura 33. Mapa de coeficientes R^2 de la relación entre SPI-3 y los índices de teleconexión en las estaciones de la cuenca Paute según el modelo de regresión Random Forest.	75
Figura 34. Mapa de coeficientes R^2 de la relación entre SPI-12 y los índices de teleconexión en las estaciones de la cuenca Paute según el modelo de regresión Random Forest.	75
Figura 35. Índice estandarizado de precipitación a escala temporal de 12 meses de la estación Corralillo, cuenca Tempisque-Bebedero, y los índices de teleconexión AMO y MEI.	77
Figura 36. Índice estandarizado de precipitación a escala temporal de 12 meses de la estación Pueblo Rico, cuenca San Juan, y los índices de teleconexión PDO y MEI.	78
Figura 37. Índice estandarizado de precipitación a escala temporal de 12 meses de la estación Cedros, cuenca Lengupá, y los índices de teleconexión AMO y MEI.	79
Figura 38. Índice estandarizado de precipitación a escala temporal de 12 meses de la estación El Labrado, cuenca Paute y los índices de teleconexión TNI y El Niño 4.	80
Figura 39. Índice estandarizado de precipitación a escala temporal de 12 meses de la estación Ushcurrumi, cuenca Jubones, y los índices de teleconexión TNI y El Niño 4.	81
Figura 40. Probabilidad de ocurrencia de sequías a) Sequías Agrícolas (SPI-3) b) Sequías Hidrológicas (SPI-12).	84

Índice de Tablas

Tabla 1. Características generales de las estaciones pluviométricas. La precipitación media anual fue calculada del período 1975-2014.	4
Tabla 2. Categorías de Sequías según valores SPI	17
Tabla 3. Promedio de frecuencia, duración y probabilidad de ocurrencia anual de las sequías según el índice estandarizado de precipitación a escala temporal de 3 meses.....	27
Tabla 4. Promedio de frecuencia, duración y probabilidad de ocurrencia anual de las sequías según el índice estandarizado de precipitación a escala temporal de 12 meses.....	28
Tabla 5. Frecuencia y duración total de las sequías según el índice estandarizado de precipitación a escala temporal de 3 meses en la cuenca Tempisque-Bebedero.	32
Tabla 6. Sequías de mayor magnitud según el índice estandarizado de precipitación a escala temporal de 3 meses en la cuenca Tempisque-Bebedero...32	32
Tabla 7. Frecuencia y duración total de las sequías según el índice estandarizado de precipitación a escala temporal de 12 meses en la cuenca Tempisque-Bebedero.	35
Tabla 8. Sequías de mayor magnitud según el índice estandarizado de precipitación a escala temporal de 12 meses en la cuenca Tempisque-Bebedero. 36	36
Tabla 9. Frecuencia y duración total de las sequías según el índice estandarizado de precipitación a escala temporal de 3 meses en la cuenca San Juan.	37
Tabla 10. Sequías de mayor magnitud según el índice estandarizado de precipitación a escala temporal de 3 meses en la cuenca San Juan.	37
Tabla 11. Frecuencia y duración total de las sequías según el índice estandarizado de precipitación a escala temporal de 12 meses en la cuenca San Juan.	38
Tabla 12. Sequías de mayor magnitud según el índice estandarizado de precipitación a escala temporal de 12 meses en la cuenca San Juan.	39
Tabla 13. Frecuencia y duración total de las sequías según el índice estandarizado de precipitación a escala temporal de 3 meses en la cuenca Lengupá.....	42
Tabla 14. Sequías de mayor magnitud según el índice estandarizado de precipitación a escala temporal de 3 meses en la cuenca Lengupá.	43

Tabla 15. Frecuencia y duración total de las sequías según el índice estandarizado de precipitación a escala temporal de 12 meses en la cuenca Lengupá.....	46
Tabla 16. Sequías de mayor magnitud según el índice estandarizado de precipitación a escala temporal de 12 meses en la cuenca San Juan.	47
Tabla 17. Frecuencia y duración total de las sequías según el índice estandarizado de precipitación a escala temporal de 3 meses en la cuenca Paute.	50
Tabla 18. Sequías de mayor magnitud según el índice estandarizado de precipitación a escala temporal de 3 meses en la cuenca Paute.....	51
Tabla 19. Frecuencia y duración total de las sequías según el índice estandarizado de precipitación a escala temporal de 12 meses en la cuenca Paute.	54
Tabla 20. Sequías de mayor magnitud según el índice estandarizado de precipitación a escala temporal de 12 meses en la cuenca Paute.....	54
Tabla 21. Frecuencia y duración total de las sequías según el índice estandarizado de precipitación a escala temporal de 3 meses en la cuenca Jubones.	56
Tabla 22. Sequías de mayor magnitud según el índice estandarizado de precipitación a escala temporal de 3 meses en la cuenca Jubones.....	56
Tabla 23. Frecuencia y duración total de las sequías según el índice estandarizado de precipitación a escala temporal de 12 meses en la cuenca Jubones.	57
Tabla 24. Sequías de mayor magnitud según el índice estandarizado de precipitación a escala temporal de 12 meses en la cuenca Jubones.....	57
Tabla 25. Coeficiente de determinación R^2 de la relación entre el SPI a escala temporal de 3 meses y los índices de teleconexión según la regresión lineal múltiple y la regresión Random Forest.	64
Tabla 26. Coeficiente de determinación R^2 de la relación entre el SPI a escala temporal de 12 meses y los índices de teleconexión según la regresión lineal múltiple y la regresión Random Forest.	69
Tabla 27. Sequías agrícolas (SPI-3) de mayor magnitud por cuenca.	85
Tabla 28. Sequías hidrológicas (SPI-12) de mayor magnitud por cuenca.	86

Abreviaturas Utilizadas

AMO	Atlantic Multidecadal Oscillation
ENOS	El Niño Oscilación del Sur
MEI	Multivariate ENSO Index
NAO	North American Oscillation
PDO	Pacific Decadal Oscillation
RF	Random Forest
RLM	Regresión Lineal Múltiple
SPI	Standarized Precipitation Index
ZCIT	Zona de Convergencia Intertropical

Resumen

Esta investigación pretende brindar un aporte al conocimiento de la sequía en los trópicos mediante el estudio de cinco cuencas ubicadas en tres países: Tempisque-Bebadero (Costa Rica), San Juan (Colombia), Lengupá (Colombia), Paute (Ecuador) y Jubones (Ecuador). El objetivo principal de este estudio es comparar el comportamiento de la sequía de acuerdo a la frecuencia, duración, magnitud e intensidad, así como la relación con la teleconexión.

Se utilizaron datos observados de precipitación del período 1975-2014 de 17 estaciones pluviométricas, para calcular el índice estandarizado de precipitación (SPI) a escalas temporales de 3 y 12 meses, con el fin describir el desarrollo las sequías agrícolas e hidrológicas. Además se incluyen datos estandarizados de 9 índices de teleconexión: El Niño 1+2, El Niño 3, El Niño 3.4, El Niño 4, MEI, TNI, PDO, NAO y AMO.

Para el análisis de la relación entre la sequía y la teleconexión se utilizaron dos métodos de regresión: regresión lineal múltiple (RLM) y regresión por bosques aleatorios o Random Forest (RF). Se usó el coeficiente de determinación ajustado R^2 para medir la relación entre el SPI y los índices de teleconexión. También se determina la importancia relativa de cada índice en el modelo, con el objetivo de identificar los principales fenómenos de teleconexión que influyen en la aparición de las sequías.

Los resultados muestran que las sequías de intensidad moderada son más comunes y duraderas en las cuencas ecuatorianas de Jubones y Paute; las sequías de intensidad severa son más frecuentes en las cuencas Paute y Lengupá a escala trimestral, pero se extienden durante más tiempo en la cuenca San Juan. Sin embargo, a escala anual las sequías severas son más duraderas y frecuentes en la cuenca San Juan. Las sequías extremas son más habituales y duraderas en la cuenca Tempisque-Bebadero.

La relación entre el SPI y los índices de teleconexión muestran un patrón diferenciado entre las cuencas localizadas en la vertiente pacífica y las cuencas andinas. Los coeficientes de determinación derivados de los dos métodos de regresión indican que las cuencas Tempisque-Bebadero, San Juan y Jubones, ubicadas en la vertiente del Pacífico presentan un coeficiente R^2 promedio mayor que las cuencas Lengupá y Paute ubicadas en la cordillera de los Andes. La

cuenca Jubones, del pacífico ecuatoriano obtuvo el registro más alto de coeficiente R^2 , mientras que la cuenca Lengupá, de los Andes colombianos, presentó el menor promedio de R^2 .

En la cuenca Tempisque-Bebedero, de acuerdo a la regresión RF, el índice de mayor importancia es la AMO, tanto a escala trimestral como anual del SPI; por otro lado, la RLM registra los índices AMO, El Niño 3.4 y MEI como los más importantes en ambas escalas temporales. El Niño 3.4 fue el índice más importante a escala trimestral en la cuenca San Juan de acuerdo a los dos métodos de regresión; mientras que a escala anual, El Niño 4 y la PDO fueron los índices de mayor importancia según la RLM y la regresión RF respectivamente. Las estaciones de la cuenca Lengupá indicaron que la AMO fue el índice de mayor importancia en los dos métodos de regresión, tanto a escala trimestral como anual. La cuenca Paute, pese a su variabilidad, los índices de mayor importancia fueron El Niño 3.4 y el TNI a escala trimestral; mientras que a escala anual lo fueron el TNI, El Niño 4 y la PDO en ambos métodos de regresión. En la cuenca Jubones, el TNI fue el índice más importante tanto a escala trimestral como anual, y en ambos métodos de regresión.

Se concluye que el SPI es útil para comparar sitios con características climáticas diferentes, sin embargo muestra debilidades para analizar las sequías en lugares áridos y semiáridos; por lo tanto se recomienda el uso del SPI en conjunto con otros índices que permitan medir el volumen del déficit de precipitación. Se recomienda considerar los índices AMO y PDO, en conjunto con los índices ENOS para monitorear y pronosticar sequías. Además se debe explorar otros índices de teleconexión, especialmente del Atlántico, con el fin de mejorar la comprensión de la variabilidad de la precipitación en la región.

Capítulo 1. Aspectos Generales

1.1 Introducción

La sequía ha sido comúnmente caracterizada por ser la amenaza hidrometeorológica de mayor complejidad y la que afecta a mayor número de personas, debido a su impacto en múltiples sectores de la economía (Wilhite et al. 2007). En el contexto latinoamericano, de acuerdo con la FAO y la OPS (2017), entre 2011 y 2015 la sequía fue el fenómeno que afectó a un mayor número de habitantes y que mayores pérdidas económicas generó.

Las pérdidas monetarias se ven reflejadas principalmente en la agricultura, la ganadería, el abastecimiento de agua potable y la generación de energía hidroeléctrica, entre otros aspectos. El sector agrícola es uno de los más perjudicados por la sequía, debido a que los daños trascienden lo económico y se manifiestan en el ámbito social. Las pérdidas de cosechas y la disminución del rendimiento acarrearán también el aumento de precios, la pérdida de fuentes de empleo, la inseguridad alimentaria y la desnutrición infantil, afectando principalmente a la población más vulnerable (GWP Centroamérica, 2016).

De acuerdo con Ortega (2013) las causas generalmente aceptadas de las sequías se pueden agrupar en dos orígenes: natural y antropogénico. Las causas naturales son aquellas relacionadas con los patrones de circulación general de la atmósfera, la interacción océano-atmósfera y la influencia de la actividad solar. Las causas de origen antropogénico, están vinculadas con las actividades humanas, que según los expertos, existe evidencia de que éstas son las responsables del incremento de la temperatura global en los últimos 50 años (Ortega, 2013). Según este autor, las modificaciones antropogénicas han alterado los patrones de temperatura y precipitación, y han sido partícipe en las anomalías hidrometeorológicas de los últimos años, incluyendo la mayor frecuencia e intensidad de las sequías.

La presente investigación expone cinco casos de cuencas tropicales en América Latina: Tempisque-Bebedero (Costa Rica), San Juan (Colombia), Lengupá (Colombia), Paute (Ecuador) y Jubones (Ecuador). A partir de una base de datos de 17 estaciones pluviométricas, se pretende estudiar y comparar la sequía mediante el índice estandarizado de precipitación (SPI).

La comparación incluye un análisis de teleconexión, que consiste en el vínculo climático entre regiones separadas geográficamente (Nigam y Baxter, 2015). Para ello se utilizarán índices de teleconexión tales como: El Niño (en sus variantes 1+2, 3, 3.4, 4), Índice Multivariado del Niño (MEI), Índice Transniño (TNI), Oscilación Decenal del Pacífico (PDO), Oscilación del Atlántico Norte (NAO) y Oscilación Multidecadal del Atlántico (AMO).

La presente investigación se enmarca dentro del proyecto TropiSeca, en el cual participan la Universidad de Costa Rica, el Instituto de Tecnología y Gestión de Recursos en los Trópicos y Subtrópicos en Colonia en Alemania, la Universidad Javeriana en Colombia y la Universidad de Cuenca en Ecuador. El propósito de este proyecto es el intercambio de información para generar conocimientos acerca de los impactos de las sequías en las cuencas tropicales.

1.2. Delimitación Espacial

El área de estudio corresponde a las cuencas tropicales ubicadas en Costa Rica, Colombia y Ecuador. Las cuencas Tempisque-Bebadero (Costa Rica), San Juan (Colombia) y Jubones (Ecuador) desembocan en el Océano Pacífico. La cuenca del Lengupá (Colombia) pertenece a la cuenca del río Orinoco y la del Paute (Ecuador) a la del río Amazonas, por lo tanto ambas desembocan en el océano Atlántico. La Figura 1 muestra la ubicación de las cuencas y las estaciones pluviométricas seleccionadas, las cuales están enumeradas de la siguiente forma: 1. La Guinea. 2. Gramita. 3. Corralillo. 4. Pueblo Rico. 5. Rondón. 6. Zetaquirá. 7. Campo Buenavista. 8. Páez. 9. Cedros. 10. Piedra Campana. 11. El Labrado. 12. Sayausi. 13. Ricaurte Cuenca. 14. Gualaceo. 15. Paute. 16. Río Mazar Rivera. 17. Ushcurrumi

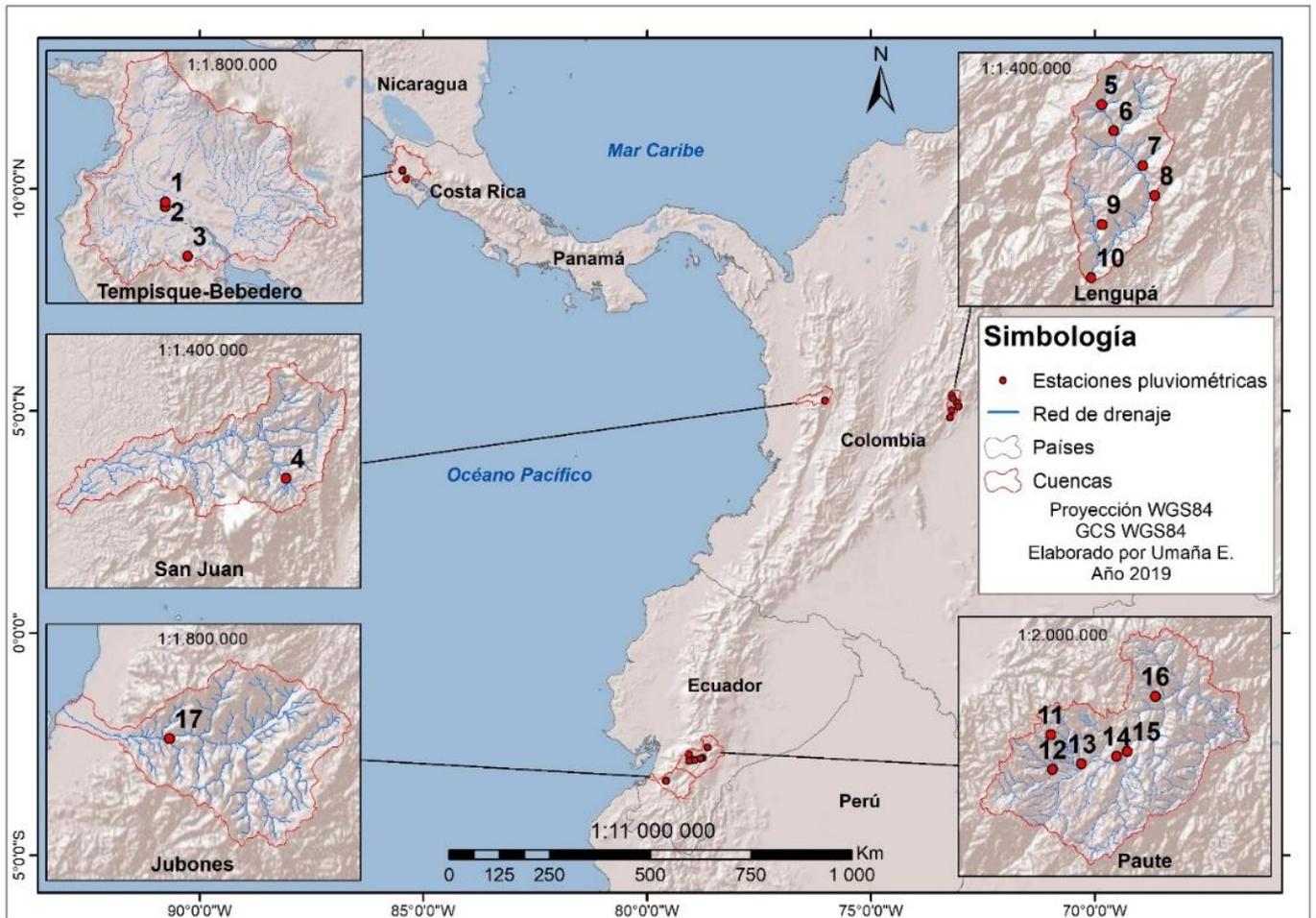


Figura 1. Mapa de ubicación de las cuencas en estudio.

La Tabla 1 describe las características principales de cada una de las estaciones pluviométricas seleccionadas que se muestran en la Figura 1

Tabla 1. Características generales de las estaciones pluviométricas. La precipitación media anual fue calculada del período 1975-2014.

País	Vertiente	Cuenca	Estaciones	Altitud (msnm)	Latitud	Longitud	Prec. Media anual (mm)
Costa Rica	Pacífico	Tempisque-Bebedero	La Guinea	12	10.416	-85.466	2271
			Gramita	11	10.400	-85.466	2353
			Corralillo	34	10.216	-85.383	2352
Colombia	Pacífico	San Juan	Pueblo Rico	1530	5.233	-76.031	2250
			Rondón	2120	5.358	-73.203	2034
	Atlántico (Orinoco)	Lengupá	Zetaquirá	1720	5.283	-73.169	1841
			Campo Buenavista	1370	5.183	-73.086	2002
			Páez	1350	5.096	-73.053	3168
			Cedros	1600	5.013	-73.203	3035
			Piedra Campana	450	4.860	-73.234	4340
Ecuador	Atlántico (Amazonas)	Paute	El Labrado	3440	-2.732	-79.073	1257
			Sayausi	2780	-2.875	-79.065	1064
			Ricaurte Cuenca	2437	-2.850	-78.948	931
			Gualaceo	2230	-2.820	-78.805	806
			Paute	2290	-2.800	-78.762	765
			Río Mazar Rivera	1964	-2.573	-78.650	1329
	Pacífico	Jubones	Ushcurrumi	290	-3.321	-79.583	730

La cuenca Tempisque-Bebedero posee un área de 5.460 Km² y se ubica en la provincia de Guanacaste. La altitud máxima de la cuenca es de 1916 msnm, en el Volcán Rincón de la Vieja, y la altitud promedio es de 260 msnm, con una pendiente media en toda la cuenca de 6° (Birkel et al., 2017). El clima de la cuenca es de tipo tropical estacional, con dos estaciones bien definidas: una seca que se extiende de diciembre a abril, y la lluviosa de mayo a noviembre (Birkel et al., 2017). Marzo es el mes más seco y caluroso, mientras que septiembre y octubre son los meses más lluviosos debido principalmente a la posición de la Zona de Convergencia Intertropical y los vientos monzones provenientes del océano pacífico ecuatorial (IMN, s.f). Entre julio y agosto hay un breve período de canícula o “veranillo” en el cual hay una disminución relativa de la precipitación (IMN, s.f).

La cuenca del San Juan tiene un área de 16.465 Km², y está compuesta por nueve subcuencas. El área se sitúa principalmente en el departamento de Chocó y en menor medida en los departamentos del Valle y Risaralda (Sánchez y

Barquero-Bernal, 2011). Esta investigación se centra en la subcuenca denominada San Juan Alto, ubicada en la cuenca alta del río San Juan, que posee una superficie aproximada de 2.009,3 Km². El río nace a 3900 msnm en el cerro Caramanta, en el oeste de la Cordillera Occidental de los Andes colombianos (Restrepo et al., 2002). El clima de la cuenca San Juan hasta los 800 m. de altitud es de tipo cálido muy húmedo y pluvial, caracterizado por una alta humedad del aire, temperaturas de 24° C en promedio anual y una precipitación promedio alrededor de los 10.000 mm anuales (IIAP, 2013). En las zonas más elevadas hay un clima frío, que se distingue por tener temperaturas entre los 12° a 18°C, con una precipitación que varía entre los 1.000 a 3.000 mm anuales (IIAP, 2013).

La cuenca del Lengupá está situada en la Cordillera Oriental de los Andes colombianos, en el departamento de Boyacá (Bastidas, 2014), y su superficie es de 1635.3 Km² aproximadamente. El río Lengupá es el resultado de la unión de los ríos Mueche y Fuche, los cuales nacen en los páramos de Siachoque y Bijagual respectivamente (Bastidas, 2014). La cuenca del Lengupá es una de las 5 subcuencas que conforman la cuenca del río Meta, que a su vez forma parte de la gran cuenca del río Orinoco (Gobernación de Boyacá, 2012). En esta cuenca, la actividad agropecuaria de subsistencia es la más importante, no obstante se destaca la ganadería de carne y leche (Bastidas, 2014).

La cuenca del río Paute tiene un área de 6.439 Km² y representa el 2,5% del territorio de Ecuador. Su territorio lo comparten las provincias de Azuay, Cañar y Morona Santiago, y cuenta con una población de 650.317 habitantes, según el censo de 2010 (Cordero, 2013). El río nace en la Cordillera de los Andes, a partir los 4.600 msnm y fluye hacia la vertiente amazónica, hasta los 500 msnm (Cordero, 2013). Forma parte de la cuenca del Santiago Namangoza, que a su vez pertenece a la cuenca del río Amazonas (Valarezo, 2017).

Las precipitaciones en la cuenca del Paute presenta una gran variabilidad espacial, debido principalmente a factores orográficos y a la confluencia de masas de aire del pacífico y la humedad proveniente de la región amazónica (Cordero, 2013). De acuerdo con Célleri et al. (2007), la cuenca posee dos regímenes de precipitación: unimodal (máxima entre junio y julio) y bimodal (máximas en abril y octubre). Ambos regímenes se subdividen de acuerdo a la precipitación media anual en: unimodal 1 y unimodal 2, y bimodal 1 y bimodal 2. El régimen unimodal 1 presenta una precipitación media anual entre los 2.900 a los 3.400

mm, mientras que el unimodal 2 tiene un rango entre los 1.100 a los 1.600 mm. El bimodal 1 presenta una precipitación media anual entre los 660 a los 1.100 mm, y el bimodal 2 entre los 1.000 a los 1800 mm. El régimen bimodal 2 es propio de la cuenca alta, a partir de los 3.000 msnm y es la que más área posee en la cuenca, mientras que el régimen bimodal 1 es propio de la de la cuenca media. Los regímenes unimodal 1 y 2 se ubican en la parte baja de la cuenca y representan la menor proporción de área respecto a los demás regímenes (Célleri et al., 2007)

La cuenca alta del río Paute posee un clima frío semihúmedo, con una precipitación que varía entre los 1000-2000 mm anuales, y una temperatura promedio de 8°C, influenciado principalmente por las masas de aire del Pacífico. La cuenca media se caracteriza por poseer una precipitación entre los 500 a 1.000 mm anuales con una temperatura media de 15°C; y la cuenca baja la precipitación media es superior a los 2.000 mm anuales con una temperatura media de 20°C (Cordero, 2013).

La cuenca del Jubones está ubicada al sur de Ecuador y cuenta con una superficie de 4361.7 Km², abarcando los territorios de las provincias del Azuay, Loja y El Oro, y cuenta con una población aproximada de 220.613 habitantes (Fajardo, 2010). Los valores de precipitación promedio en la parte alta de la cuenca oscilan entre los 293 mm a los 470,9 mm anuales en altitudes entre los 1310 a los 2600 msnm; mientras que a 500 msnm, se registra la precipitación máxima, con valores entre los 587 mm a los 1.336 mm anuales (Luna-Romero et al., 2018). El clima de la cuenca Jubones es propio del litoral ecuatoriano, el cual está determinado por el movimiento estacional de la Zona de Convergencia Intertropical (ZCIT), así como la influencia de la cordillera de Los Andes (Luna-Romero et al., 2018). Esta región se caracteriza por poseer un único período de lluvias que se extiende de diciembre a mayo, el cual coincide con el posicionamiento de la ZCIT y el incremento de la temperatura de la superficie del mar que inducen la formación de masas de aire húmedas cálidas que originan las lluvias en la zona (Ochoa et al., 2014). Durante la estación seca sucede lo contrario, la ZCIT se desplaza hacia el norte permitiendo la entrada de masas de aire secas y frías descendientes (Ochoa et al., 2014).

1.3. Delimitación Temporal

El período de estudio comprende entre enero de 1975 a diciembre de 2014, de acuerdo con las fechas de los datos observados de precipitación.

1.4. Problema de Investigación

Existe una limitación de conocimiento en la región debido a la escasez de datos pluviométricos observados de buena calidad y con registros largos que permitan estudiar la sequía, explicar cómo varía su comportamiento de acuerdo a la ubicación geográfica y cómo influye la teleconexión en el desarrollo de las sequías. A partir del interés en conocer el comportamiento de la sequía en el trópico latinoamericano, surgen las siguientes preguntas:

¿Cómo varía el número, intensidad y duración de las sequías en las cuencas seleccionadas?

¿Cuál es la relación entre la sequía y los índices de teleconexión y cuáles de estos índices tienen mayor peso en el desarrollo de las sequías en las cuencas seleccionadas?

¿Cuáles son las principales diferencias y semejanzas del comportamiento de la sequía y su relación con la teleconexión en las cuencas seleccionadas a una escala regional?

1.5. Justificación

La sequía es una amenaza que tiene el potencial de provocar impactos severos en la sociedad, la economía y los ecosistemas. Los daños de las sequías se manifiestan cuando hay limitación en el acceso al agua para consumo humano y para riego, restricciones en la generación de energía hidroeléctrica, afectación a la producción agropecuaria, deterioro de los ecosistemas, e inseguridad alimentaria, entre muchos otros. En Centroamérica, los fenómenos hidrometeorológicos son los que mayor impacto genera en la agricultura, donde el 60% de ellos se asocian a sequías (GWP Centroamérica, 2016). En la sequía del año 2014 se estima que las pérdidas en agricultura rondaron los US\$500 millones incluyendo solamente cultivos de maíz y frijol; en el sector hidroeléctrico, debido a la disminución de la precipitación, se recurrió a la utilización de combustibles fósiles para satisfacer la demanda, con un costo de sustitución para la región de aproximadamente de US\$186 millones; el suministro de agua potable se vio afectado, por lo tanto se

requirió el uso de camiones cisterna y el bombeo de agua a mayores profundidades en los pozos, generando así costos adicionales de aproximadamente US\$1.5 millones (GWP Centroamérica, 2016).

En América Latina “las pérdidas de ingresos que provoca una sequía son cuatro veces mayores que las de una inundación” (Damania et al., 2017, p.4). A pesar de que existe el conocimiento de los efectos de las sequías, aunado a la disponibilidad recursos tecnológicos y políticas en la materia, generalmente la gestión y la planificación son omitidas hasta que la crisis surge (FAO, 2017). Lo anterior revela la importancia de tomar medidas precautorias ante este tipo de amenazas, de tal manera que los impactos económicos y sociales se minimicen.

El incremento de la temperatura global se ha asociado al aumento de los eventos meteorológicos extremos, por lo tanto, fenómenos como las sequías pueden aumentar también su intensidad y recurrencia, especialmente en “aquellas regiones cuyos montos de precipitaciones serán menores en el futuro como consecuencia del cambio climático” (Ravelo et al., 2016, p.11). Por lo tanto, la realización de monitoreos y modelados de sequías resulta fundamental para mejorar la comprensión del fenómeno en la región, y poder visualizar futuros escenarios, de modo que contribuya a la planificación y la toma de decisiones. Según proyecciones climáticas, para finales del presente siglo en la región de Centroamérica y el Caribe, se vislumbra un escenario en el cual las precipitaciones disminuirán en el istmo centroamericano, Antillas Mayores y Menores, mientras que en la costa pacífica de Colombia, Ecuador y Perú se espera un aumento de las lluvias; además se proyecta un incremento de la temperatura a nivel continental donde Costa Rica sería uno de los países afectados (Castillo et al., 2018).

La sequía en el trópico no ha sido estudiada en profundidad, debido a que comúnmente se relaciona la sequía exclusivamente a regiones secas, no obstante, puede presentarse en todas las zonas del planeta (Ponvert-Delisle, 2016). Además, es común subestimar la presencia de las sequías por el hecho de que sus consecuencias no son inmediatas, sin embargo, cuando se prolongan por mucho tiempo causan daños de grandes proporciones, que incluso superan a los causados por cualquier otro fenómeno meteorológico en término monetarios (Velasco et al., 2005).

La influencia de la teleconexión, especialmente del ENOS, ha sido objeto de investigación por sus impactos en la sequía e inundaciones en el trópico latinoamericano. La relación de la fase cálida del ENOS con la sequía en la vertiente pacífica del istmo centroamericano ha sido objeto de estudio en investigaciones como el de Birkel (2005a). En el caso específico de Costa Rica, Birkel (2005b) ha estudiado la sequía y su relación con los índices ENOS (EL Niño Oscilación del Sur), NAO (North Atlantic Oscillation) y SO (Southern Oscillation). No obstante, es necesario un estudio que profundice la influencia de la teleconexión en la sequía a nivel regional, que contribuya a la comprensión de dichas relaciones.

Las cuencas seleccionadas cumplen roles fundamentales en la economía de los países, siendo éstas importantes en aspectos claves tales como la seguridad alimentaria, la producción de agua potable y la generación energía hidroeléctrica. Citando un par de ejemplos, en la cuenca del Tempisque-Bebedero, el 28% de su área (940 Km²) es utilizada para el cultivo y la ganadería, por lo tanto es una cuenca muy vulnerable a las variaciones estacionales de la precipitación y a los eventos del ENOS (Birkel et al., 2017); la planta hidroeléctrica ubicada en la cuenca Paute, provee alrededor del 60% del total de energía producida en el país (Domínguez, 2013), además supe de agua potable a la ciudad de Cuenca, en Ecuador.

1.6. Antecedentes

Gran parte de los estudios relacionados con la sequía en los últimos años, han tomado como base el índice estandarizado de precipitación (SPI en sus siglas en inglés) desarrollado por McKee et al. (1993) en Fort Collins, Colorado. Este índice llegó a mejorar la forma de medir y estudiar las sequías, superando las limitaciones del Índice de Palmer en cuanto a flexibilidad de las escalas temporales (Hayes et al, 2000). Esta metodología se ha sido utilizada muchos países del mundo, y ha sido recomendada por la Organización Mundial de Meteorología para describir las características de las sequías meteorológicas (OMM, 2012). Entre sus principales virtudes están la sencillez y facilidad del cálculo, su robustez estadística, la posibilidad de incluir diferentes escales temporales, el uso únicamente de datos mensuales de precipitación, y su facilidad de comprensión en comparación a otros índices de sequía (OMM, 2012).

En Latinoamérica, el SPI ha sido muy utilizado en investigaciones para caracterizar las sequías. En Honduras, Veroy y otros (2014) analizaron la sequía en la cuenca del río Bonito, mediante el cálculo del SPI a partir de datos de precipitación del período 1958-2012 de 7 estaciones meteorológicas. Los autores relacionan las sequías más intensas con la fase cálida del ENOS, destacando los períodos de 1986-1988, 1995, 2009-2010 categorizados como de sequía severa. Una de las principales conclusiones de este artículo es el hecho de que en el 60% de los casos que hubo fenómeno del niño, se presentaron sequías. La principal limitación de este artículo es que no hay cuantificación del déficit en términos de magnitudes ni duración.

Un estudio del comportamiento espacio temporal de la sequía en la región centroamericana en el período 1950-2014, fue realizado por Muñoz et al. (2018), donde destaca la relación de la sequía con el fenómeno ENOS. El estudio se basó en el cálculo del SPI a escala anual, a partir de una base de datos compuesta de 132 estaciones. Los autores realizaron una interpolación a través del método IDW, con un 1 Km² de resolución espacial. Posteriormente se compararon las tendencias del período completo con el subperíodo 1990-2014, utilizando la prueba de tendencia de Mann-Kendall. Entre los hallazgos más importantes se destaca el hecho de que los episodios del Niño producen condiciones secas en la vertiente pacífica de Centroamérica y húmedas en el Caribe, aunque esto no ocurre siempre; además se afirma que el ENOS no es la única teleconexión que influye en Centroamérica, y que la fase cálida no siempre genera sequías; también se menciona que los déficits pueden expandirse más allá del Corredor Seco Centroamericano, e incluir la vertiente del Caribe.

En América del Sur, Giddins y Soto (2006) estudiaron la relación de las teleconexiones con la precipitación, a través del SPI a escala de 1 mes, con datos tomados de la Red Climatológica Histórica Global. La base de datos consta de 2016 estaciones del período 1948 -2004 y datos de índices de teleconexión tales como la Oscilación Antártica (AAO), Oscilación Ártica (AO), Temperatura Global Superficial del Mar (GL), Atlántico Norteño (NAf), Oscilación del Atlántico Norte (NAO), Niño 3.4, Pacífico Norteño (NP), Oscilación Sureña (SOI), Manchas Solares (Sun), Atlántico Tropical Norteño (TNA), Atlántico Tropical (TSA) y Warm Pool (WP). Se utilizó la correlación lineal y el coeficiente de correlación de Pearson para medir la relación entre los datos observados y cada

uno de los índices de teleconexión, y posteriormente se interpolaron los datos para generar un mapa de cada índice. Los índices medidos ubicados en el Pacífico tienden a tener mayor relación con las precipitaciones en Sudamérica, en especial el Niño 3.4 y el SOI; los índices AO, NAF, NAO y manchas solares no presenta teleconexión; el AAO tiene relación con exceso de humedad en el norte del subcontinente; los índices del Atlántico como el TNA y TSA están relacionados con sequías.

En Colombia, Loaiza et al. (2015) realizaron una caracterización de la sequía meteorológica en la cuenca del río Dagua en Colombia. Se utilizaron datos pluviométricos del período 1982-2011 de 19 estaciones meteorológicas ubicadas en la cuenca. Se calculó el SPI de 1, 3 y 6 meses, los cuales indicaron eventos de sequía que coinciden con fase cálida del Niño, en especial durante el período 1991-1992, donde se registró la sequía de mayor magnitud en la región. También se analizan aspectos como la intensidad, duración, magnitud, cobertura espacial y umbrales de precipitación. Además, este estudio describe espacialmente la gravedad de las sequías y calcula los valores de la lámina de lluvia en la cuenca alta, media y baja.

En Ecuador, Pacheco et al. (2008), elaboraron un análisis de la sequía a partir de una base de datos de 17 estaciones, la cual se le aplicó el SPI de 12 meses en la cuenca del río Paute. Los valores de sequía se analizaron en tres intervalos de tiempo 1985-1989, 1990-1994 y 2000-2004 correspondientes a los períodos más secos. Los autores realizaron un mapeo interpolando los valores de SPI a través del método Kriging. Se concluye que los meses más secos son los que se esperaban a partir de estudios anteriores, sin embargo, el mes de mayo de 1985 registró un SPI de -1.32 en promedio, siendo el más seco de los períodos estudiados. Los autores tienen la hipótesis de que las sequías pueden relacionarse a fenómenos de gran escala que modifican los patrones de lluvia tales como El Niño, la influencia de la corriente de Humboldt y la situación del anticiclón, sin embargo no se realiza un análisis en este sentido. También se concluye que el SPI presenta el problema que no toma en cuenta variables como como altitud, temperatura, pendiente y otros aspectos que influyen en la precipitación. Esta investigación únicamente se concentró en el estudio de la afectación de la sequía en los recursos hídricos, debido a que se utilizó una escala de 12 meses de SPI.

También en la cuenca del río Paute, Valarezo (2017), caracterizó la sequía utilizando el SPI de 3, 6, 9, 12, y 24 meses, a partir de datos mensuales de 8 estaciones pluviométricas en el período 1980-2010, con los cuales se determinaron los parámetros de persistencia, duración, severidad, frecuencia y número de eventos, además de la ocurrencia y severidad. Asimismo el estudio tuvo la finalidad de determinar en qué grado la sequía tenía un comportamiento regional dentro de la cuenca. Los resultados 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, facilitando la caracterización de sequías. Se registró la sequía más importante del período de estudio en el año 1985.

En Costa Rica, Bocanegra (2017) en su tesis de maestría, analizó la implicación de la sequía hidrológica en producción agrícola, especialmente con el cultivo del arroz, en la cuenca del río Tempisque. Se utilizó el SPI y el SDI (Streamflow Drought Index), con el cual se analizó la distribución espacial y temporal basada en la caracterización de los períodos secos en términos de frecuencia, severidad, duración y estacionalidad.

Birkel (2006), analizó la sequía hidrológica en Costa Rica con el fin de determinar si ésta aumentó su severidad y frecuencia en los años anteriores. El autor utilizó el método del umbral a series de caudal diario para 17 cuencas ubicadas en sitios con características físicas distintas. También se determinaron aspectos como la duración, el número de eventos, volumen del déficit, severidad y frecuencia de la sequía, mediante la constante Q90 percentil de exceso. Además se utiliza el método no paramétrico Mann-Kendall para detectar tendencias en el período de 1973-2003 en las 17 estaciones fluviométricas. Se concluye que no se encontraron tendencias significativas para todo el país, sin embargo muestran un patrón espacial.

Birkel (2005a) estudia la sequía en Centroamérica, a partir de la evaluación y la medición de la sequía en el Golfo de Fonseca. El estudio pretende establecer métodos para caracterizar la sequía en Centroamérica, de acuerdo a las características físicas y socioeconómicas de la región. Se utilizó el SPI con series de datos de 30 años de 6 estaciones meteorológicas cercanas al Golfo de Fonseca; también se aplicó el Índice de Palmer con datos de precipitación y temperatura de 25 años. Se concluye que el Índice de Palmer describe mejor la sequía en

Centroamérica, ya que es útil para la toma de decisiones dentro de un plan de acción de alarma temprana y además permite el cálculo a valores semanales; no obstante se advierte de la limitación de este índice en los trópicos, y que se hubiese deseado una mayor cantidad de datos para que los resultados sean más óptimos.

1.7. Objetivos

Objetivo General

Analizar y comparar el comportamiento de la sequía y la influencia de la teleconexión a través de índices cuantitativos en las cuencas tropicales Tempisque-Bebadero (Costa Rica), San Juan (Colombia), Lengupá (Colombia), Paute (Ecuador) y Jubones (Ecuador) en el período 1975-2014.

Objetivos Específicos

- Caracterizar las sequías en términos frecuencia, duración, intensidad y probabilidad de ocurrencia, mediante el índice estandarizado de precipitación (SPI).
- Analizar la relación entre las sequías y la teleconexión a través del modelo de regresión lineal múltiple y el modelo de regresión Random Forest.
- Comparar las cuencas tropicales Tempisque-Bebadero, San Juan, Lengupá, Paute y Jubones de acuerdo a las características de las sequías y su relación con la teleconexión.

1.8. Marco Conceptual

El concepto de sequía ha sido tema de debate entre los científicos alrededor del mundo, sin embargo no existe una definición consensuada en cuanto a umbrales de referencia. Su definición varía según el espacio geográfico (Valiente, 2001), ya que la cuantificación de la deficiencia y el tiempo son relativos de un lugar a otro. La sequía, de acuerdo con la Convención de las Naciones Unidas contra la Desertificación, es “un fenómeno natural que ocurre cuando la precipitación ha estado significativamente por debajo de los niveles registrados, causando graves desequilibrios ecológicos que afectan negativamente al sistema de producción de recursos terrestres” (UN Secretariat General, 1994).

Esta definición describe de forma general el concepto de sequía, no obstante existen muchas otras perspectivas acerca de este término. Wilhite y Glantz en 1985, categorizaron 150 definiciones de sequía en 4 grupos: sequía meteorológica, sequía hidrológica, sequía agrícola y sequía socioeconómica. A pesar de que existen otras definiciones y categorías, la presente investigación toma como base la categorización de Wilhite y Glantz (1985).

1.8.1. Sequía Meteorológica

De acuerdo con Mishra y Singh (2010, p. 206) la sequía meteorológica “se define como la falta de precipitación en una región durante un período de tiempo”. Valiente (2001, p. 60) califica este tipo de sequía como “una expresión de la desviación de la precipitación respecto a la media durante un tiempo determinado”. Palmer (1965, citado por Valiente, 2001) define sequía meteorológica como:

Intervalo de tiempo, generalmente con una duración del orden de meses o años, durante el cual el aporte de humedad en un determinado lugar cae constantemente por debajo de lo climatológicamente esperado o del aporte de humedad climatológicamente apropiado (Palmer 1965, citado por Valiente, 2001)

1.8.2. Sequía Agrícola

La sequía agrícola se produce cuando la humedad del suelo es insuficiente para permitir el desarrollo de un determinado cultivo en cualquiera de sus fases de crecimiento (Valiente, 2001). Hace referencia a un período de tiempo en el que la humedad del suelo disminuye, causando pérdidas en cultivos, sin afectar aún los recursos hídricos superficiales (Mishra y Singh, 2010).

1.8.3. Sequía Hidrológica

De acuerdo con Mishra y Singh (2010, p. 206) la sequía hidrológica “está relacionada con un período con recursos hídricos superficiales y subsuperficiales inadecuados para los usos de agua establecidos de un sistema de gestión de recursos hídricos dado”. Según Linsley et al., (1975, citado por Valiente, 2001) es

un período durante el cual los caudales son inadecuados para satisfacer los usos establecidos bajo un determinado sistema de gestión de aguas.

1.8.4. Sequía Socioeconómica

La sequía socioeconómica ocurre cuando la demanda de un bien económico (agua) excede la oferta como resultado de un déficit relacionado con el suministro de agua (Mishra y Singh, 2010). De acuerdo con Valiente (2001, p. 63) la sequía socioeconómica “se produce cuando la disponibilidad de agua disminuye hasta el punto de producir daños (económicos y personales) a la población de la zona afectada por la escasez de lluvias”.

1.8.5. Índices de Sequía

Los índices de sequía son valores numéricos que representan el estado de la sequía en el entorno a partir de datos climáticos de indicadores tales como precipitación, temperatura, caudal, humedad del suelo y otros, en un período determinado (OMM, 2016). Estos índices proporcionan información cuantitativa de la gravedad, desarrollo cronológico y duración de los períodos de sequía, además son útiles para simplificar relaciones complejas y facilitar instrumentos para la comunicación con distintos públicos y usuarios (OMM, 2016). Los índices de sequía contribuyen también como una herramienta para prever los efectos y consecuencias de las sequías, asimismo son una referencia para los planificadores y tomadores de decisiones para la gestión del agua (OMM, 2016).

1.8.6. Índice estandarizado de precipitación (SPI)

En una metodología desarrollada por McKee et al. (1993) para monitorear y caracterizar las sequías en términos de frecuencia, duración e intensidad. Según estos autores, cualquier impacto de la sequía donde la demanda de agua exceda su disponibilidad, está relacionado a cinco fuentes de agua utilizables: humedad del suelo, el agua subterránea, la capa de nieve, escurrimientos superficiales y embalses (McKee et al, 1993).

Para utilizar este índice es necesario preparar un conjunto mensual de datos de precipitación que abarque un período continuo de al menos 30 años. Luego se selecciona un conjunto de períodos promediados para determinar un grupo de escalas temporales que pueden ser de 3, 6, 8, 12, 24 y 48 meses. Una vez

se tenga la series de datos, se procede a ajustar dicha serie a una distribución de probabilidades, en este caso una distribución gamma, para luego transformarlas en una distribución normal de modo tal que el SPI medio para la localidad y el período deseado sea cero (Edwards y Mckee, 1997, citado por OMM, 2012).

La función gamma definida por Thom (1966, citado por Edwards, 1997) es la siguiente:

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

Donde

$\alpha > 0$ α es un parámetro de forma
 $\beta > 0$ β es un parámetro de escala
 $x > 0$ x es la precipitación acumulada

$$\Gamma(\alpha) = \int_0^{\infty} y^{\alpha-1} e^{-y} dy \quad \Gamma(\alpha) \text{ es la función gamma}$$

Debido a que la función gamma no está definida para $x = 0$ y una distribución de precipitación puede contener ceros, la probabilidad acumulativa se convierte mediante:

$$H(x) = q + (1 - q)G(x)$$

De acuerdo con Edwards (1997), dado a lo tedioso de hacer la misma ecuación para todas las estaciones en todas las escalas de tiempo y para cada mes del año, el valor Z o SPI se obtiene más fácilmente computacionalmente utilizando una aproximación proporcionada por Abramowitz y Stegun (1965, citado por Edwards, 1997) que convierte la probabilidad acumulada a la variable aleatoria normal estándar Z:

$$Z \text{ SPI} = - \left(t - \frac{c_0 + c_1 t + c_2 t^2}{1 + d_1 t + d_2 t^2 + d_3 t^3} \right) \quad \text{si } 0 < H(x) \leq 0.5$$

$$Z \text{ SPI} = + \left(t - \frac{c_0 + c_1 t + c_2 t^2}{1 + d_1 t + d_2 t^2 + d_3 t^3} \right) \quad \text{si } 0.5 < H(x) < 1.0$$

dónde:

$$t = \sqrt{\ln\left(\frac{1}{(H(x))^2}\right)} \quad \text{si } 0 < H(x) \leq 0.5$$

$$t = \sqrt{\ln\left(\frac{1}{(1.0 - H(x))^2}\right)} \quad \text{si } 0.5 < H(x) \leq 1.0$$

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

Cuando los valores SPI son positivos indican que la precipitación es mayor que la media, y los valores negativos, por el contrario, indican que la precipitación es menor que la media (OMM, 2012). De acuerdo a los valores SPI, Mckee et al (1993), categorizaron la sequía, tal y como se muestra en el Tabla 2.

Tabla 2. Categorías de Sequías según valores SPI

Valores SPI	Categoría de Sequía
0 a -0.99	Sequía leve
-1.00 a -1.49	Sequía moderada
-1.50 a -1.99	Sequía severa
≤ -2	Sequía Extrema

1.8.7. Magnitud de la sequía

La magnitud corresponde al déficit acumulado de agua durante el período de sequía (Thompson, 1999, citado por Suryabhagavan, 2017). De acuerdo McKee et al. (1993) la magnitud de la sequía (DM) se obtiene mediante la siguiente ecuación:

$$DM = - \left(\sum_{j=1}^x SPI_{ij} \right)$$

Donde j representa el primer mes de una sequía y sigue aumentando hasta el final de la sequía (x) para cualquiera de las escalas de tiempo i . La magnitud tiene unidades de meses y es equivalente a la duración si cada mes de la sequía tiene $SPI = -1.0$ (McKee et al, 1993).

1.8.8. Duración de la sequía

Es el tiempo durante el cual la precipitación registrada es inferior a la precipitación media de ese mismo período (Valiente, 2001). De acuerdo con esta definición, la duración de la sequía con el SPI está determinada por el tiempo o los meses durante el cual el índice es igual o inferior a -1.00.

1.8.9. Frecuencia

Se refiere al número de casos que ocurren por un tiempo determinado (Valiente, 2001). La frecuencia absoluta se calcula contabilizando el número de eventos durante un período de tiempo específico.

1.8.10. Intensidad de la sequía

La intensidad se refiere al grado de déficit de agua, generalmente en relación con los registros históricos (Kallis, 2008). En el contexto del SPI, la intensidad de la sequía (DI) es la proporción de la magnitud de la sequía (DM) entre la duración (Dd) (Suryabhagavan, 2017), la cual se expresa de la siguiente forma:

$$DI = \frac{DM}{Dd}$$

1.8.11. Probabilidad de ocurrencia anual

La probabilidad de ocurrencia anual es el resultado de dividir la frecuencia absoluta de las sequías de cada categoría entre el número de años del período de estudio, multiplicado por 100. Esto representa la probabilidad de que un evento de sequía ocurra anualmente, basado en la frecuencia en que ocurre el evento durante un período de tiempo establecido. Este parámetro permite referenciar los sitios más propensos a sufrir una sequía de determinada categoría respecto a los que presentan menor probabilidad (Valarezo, 2017).

1.8.13. Variabilidad climática

De acuerdo a la IPCC (2013), la variabilidad climática se refiere a las “variaciones del estado medio y otras características estadísticas (desviación típica, sucesos extremos, etc.) del clima en todas las escalas espaciales y temporales más amplias que las de los fenómenos meteorológicos”. Los cambios en actividad solar, la actividad volcánica, las variaciones en oscilaciones atmosféricas y las variaciones en la química de la atmósfera son algunos de los aspectos que originan la variabilidad climática (Poleo, 2016).

1.8.13. Teleconexión

El término de teleconexión es normalmente utilizado para describir relaciones climáticas entre dos regiones geográficamente distantes. (Nigam y Baxter, 2015). Una definición más completa fue realizada por la Sociedad Americana de Meteorología (AMS), citada por Giddins y Soto (2006), expresando que la teleconexión es:

1. Un enlace entre cambios del tiempo que ocurren en regiones separadas por grandes distancias del globo terráqueo.
2. Una correlación significativa, positiva o negativa, en las fluctuaciones de un campo en puntos separados por grandes distancias. Normalmente aplicado a la variabilidad en escalas de tiempo mensuales y mayores, el nombre se refiere al hecho de que tales correlaciones sugieren que la información se está propagando entre los puntos distantes por la atmósfera.” (AMS, 2000, citado por Giddins y Soto, 2006, p.1)

1.8.14. ENOS (El Niño Oscilación del Sur)

El ENOS hace referencia a una anomalía de la interacción océano-atmósfera que se desarrolla en el océano Pacífico tropical en períodos recurrentes de 3 a 7 años aproximadamente, y es responsable de la variabilidad climática de corto plazo a nivel global y especialmente en la región tropical (Jiménez, 2008, citado por Cabezas & Vangni, 2015). Este fenómeno implica modificaciones en el comportamiento oceánico y atmosférico de forma estacional que oscila en dos extremos o fases: el Niño (fase cálida) y la Niña (fase fría). (Cabezas & Vangni, 2015).

Existen diversos índices que se utilizan para monitorear el océano Pacífico tropical, que están basados en promedios de la temperatura de la superficie del mar (SST) en una región determinada. El océano Pacífico tropical ha sido dividido en 4 regiones: El Niño 1+2, El Niño 3, El Niño 3.4, El Niño 4. Esta regionalización obedece al interés de dar seguimiento al ciclo de vida del ENOS y a la conveniencia de los barcos que se utilizaban para medir la SST (Bamston et al., 1997).

La región de El Niño 1+2 se ubica entre los 0°-10°S y los 90°W-80W, justo donde se sitúa la costa de América del Sur, lugar donde fue reconocido por primera vez el fenómeno por pobladores locales (Trenberth & NCAR, 2019). La región de El Niño 3 se sitúa entre los 5°N -5°S y los 150°W-90°W, y era el índice que se consideraba clave para definir los eventos del ENOS, hasta que más tarde se reconociera El Niño 3.4 y el ONI para tal fin (Trenberth & NCAR, 2019). El Niño 3.4 es la región que se considera clave para definir los eventos de El Niño y La Niña, y está situada entre 5N-5S, 170W-120W (Trenberth & NCAR, 2019).

Por último, la región de El Niño 4 se encuentra entre los 5°N-5S y los 160°W-120°W, en la zona central del océano Pacífico (Trenberth & NCAR, 2019).

1.8.17. TNI (Índice Transniño)

El TNI es el resultado de la diferencia entre las anomalías de la temperatura superficial del mar entre las regiones de El Niño 1+2 y el Niño 4. (Trenberth y Stepaniak, 2001).

1.8.18. MEI (Índice Multivariado de El Niño)

El MEI es un índice desarrollado por la NOAA (National Oceanic and Atmospheric Administration) que consiste en la integración de las seis principales variables observadas en el Pacífico Tropical: presión a nivel del mar, componentes zonales y meridionales del viento, temperatura de la superficie del mar, temperatura del aire en superficie y nubosidad del cielo (Mazzarella et al 2010).

1.8.15. PDO (Oscilación Decenal del Pacífico)

De acuerdo con Mantua y Hare, (2002), la Oscilación Decenal del Pacífico es un patrón duradero de ENOS, la cual se manifiesta por medio de dos modos con características espaciales y temporales diferentes de la variabilidad en la temperatura de la superficie del mar del Pacífico Norte. De acuerdo con los registros climáticos, hay evidencia de que existe una variabilidad interdecenal en la cuenca del Pacífico, cuyos eventos se manifiestan en un período entre 20 o 30 años (Mantua y Hare, 2002). Dicha oscilación afecta principalmente en el hemisferio sur, en las latitudes medias del Océano Pacífico Sur, Australia y Suramérica, además tiene una considerable influencia en la industria pesquera en el Océano Pacífico Norte (Mantua y Hare, 2002).

1.8.16. NAO (Oscilación del Atlántico Norte)

La Oscilación del Atlántico Norte es la principal variación interanual de la circulación atmosférica en el hemisferio norte, que consiste en la diferencia de presión atmosférica entre las zonas de altas presiones subtropicales y la zona de baja presión polar en el océano Atlántico Norte (Hurrell, 1995). Es el principal

moderador de los inviernos en el hemisferio norte, afectando principalmente a Europa y Norteamérica.

1.8.19. AMO (Oscilación Multidecenal del Atlántico)

La Oscilación Multidecenal del Atlántico es un patrón natural de la variación del promedio de temperatura de la superficie del mar en el océano Atlántico Norte, con fases frías y cálidas que pueden durar entre 20 y 40 años (NOAA, 2005).. De acuerdo con Enfield et al. (2001), la temperatura de la superficie del mar del Atlántico Norte en el período de 1856-1999 tiene un ciclo de 65-80 años con cambios dentro un rango de 0.4° C, con fases cálidas entre los años 1860-1880, 1940-1960 y fases frías entre los años 1905-1925 y 1979-1990.

1.8.20. Regresión lineal Múltiple por pasos (Stepwise)

El método de regresión lineal múltiple consiste en establecer una relación lineal entre una variable dependiente “Y” y un conjunto de variables independientes (X1, X2... Xn) (Rodríguez y Mora, 2001). Este método, a diferencia de la regresión lineal simple, permite un aproximación más cercana a la realidad debido a que los fenómenos, hechos y procesos sociales, por su complejidad, deben ser explicados por una serie de variables que directa o indirectamente influyen en su concreción (Rodríguez y Mora, 2001). La ecuación de la regresión lineal múltiple se puede expresar de la siguiente forma:

$$Y = a + b_1x_1 + b_2x_2 + \dots + b_nx_n + e$$

Dónde: “Y” es la variable a predecir; “a, b1x1, b2x2... bnxn” son parámetros desconocidos a estimar; y “e” es el error que se comete en la predicción de los parámetros (Rodríguez y Mora, 2001).

El método Stepwise tiene la finalidad de buscar entre todas las variables explicativas aquellas que más y mejor expliquen a la variable dependiente sin que ninguna de ellas sea combinación lineal de las restantes (Rodríguez y Mora, 2001). Existen tres tipos de métodos stepwise: hacia adelante (forward), hacia atrás (backward), y pasos sucesivos (stepwise) (Derksen y Keselman, 1992). La selección hacia adelante consiste en agregar las variables al modelo una a una, de modo que la variable que se agrega en cada paso sea la que produce la mayor reducción en la suma residual de cuadrados, concluyendo hasta que todas las variables estén en el modelo o hasta que se cumpla alguna regla de detención

(Derksen y Keselman, 1992). La selección hacia atrás inicia con todas las variables del modelo, para posteriormente eliminar en cada paso, las variables que presenten la menor inflación en la suma residual de cuadrados, y se detiene hasta que solo quede una variable en el modelo o hasta que se cumpla una regla de detención (Derksen y Keselman, 1992). El método de pasos sucesivos es una combinación de las anteriores, en la cual se inicia como si fuese hacia adelante, pero en cada paso también se verifica si la variable puede ser eliminada utilizando un proceso de eliminación hacia atrás (Derksen y Keselman, 1992).

1.8.21. Regresión de Bosques Aleatorios (Random Forest)

La regresión de bosques aleatorios o Random Forest es una técnica de clasificación supervisada que utiliza la combinación de un conjunto de árboles de decisión y luego los promedia para obtener una predicción precisa (Medina y Ñique, 2017). Cada árbol es alimentado por una muestra y es sometida a una serie de test binarios en cada nodo, llamados split, hasta llegar a una hoja en la que se encuentra la respuesta (Medina y Ñique, 2017).

La Figura 7 resume la estructura de los conceptos mencionados anteriormente.

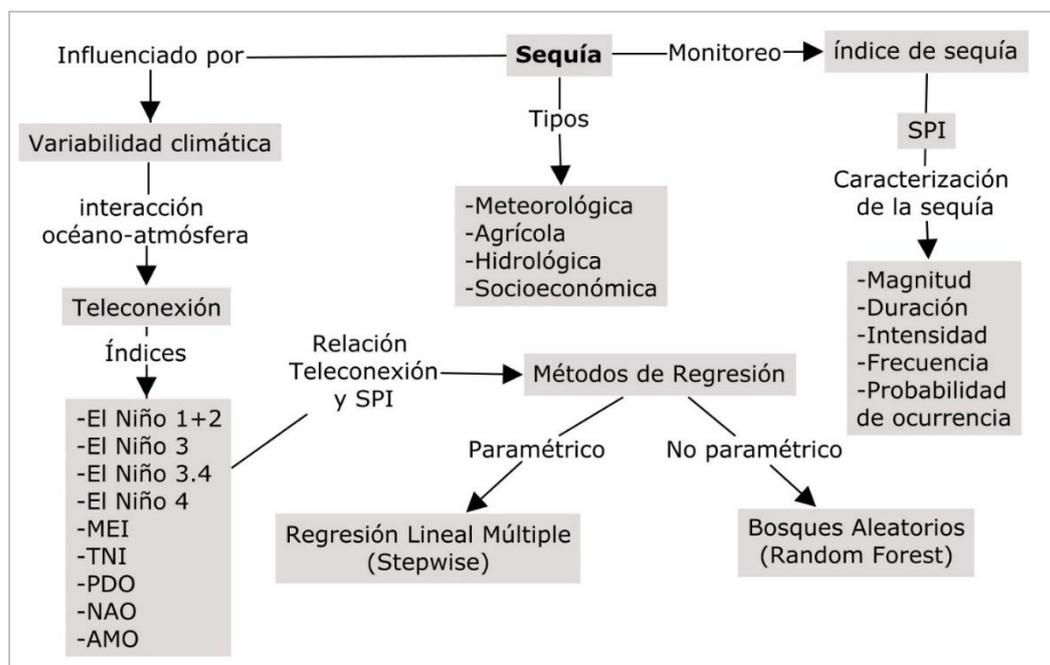


Figura 2. Estructura del marco conceptual.

1.9. Marco Metodológico

La presente investigación tiene un enfoque cuantitativo, debido a que se utilizan datos observados de precipitación para el cálculo de índices expresados en números. La investigación es de tipo explicativo debido a que se busca encontrar las causas y razones de determinados fenómenos (Behar, 2008). También es de carácter correlacional ya que se pretende visualizar si existe o no una relación de diversos fenómenos entre sí (Behar, 2008), en este caso se aspira a mejorar la comprensión de la relación entre las sequías y la teleconexión.

La unidad de análisis corresponde a la cuenca, en este caso las cinco cuencas ubicadas en Costa Rica, Colombia y Ecuador. El principal criterio de selección de estas cuencas se deriva del interés de comprender el comportamiento de la sequía tanto en la vertiente del Pacífico como en la vertiente del Atlántico (en el caso de las cuencas sudamericanas). Otro criterio importante son las facilidades que han ofrecido la Universidad de Cuenca y la Universidad Javeriana para compartir los datos observados de precipitación del período de estudio. Las bases de datos observados de precipitación provienen del Instituto Meteorológico Nacional (IMN) en el caso de Costa Rica; el Instituto de Hidrología, Meteorología y Estudios Ambientales (IDEAM) en Colombia; y los datos de Ecuador son del Instituto Nacional de Meteorología e Hidrología (INAMHI).

La primera fase de esta investigación consistió en un proceso de control de calidad con el fin seleccionar las estaciones que presentan mayor fiabilidad, así como el relleno de los datos faltantes en las estaciones que lo requerían. Se analizaron en total 75 estaciones, de las cuales 52 pertenecen a la cuenca Tempisque-Bebadero, 2 a la cuenca San Juan, 6 a la cuenca Lengupá, 13 a la cuenca Paute y 5 a la cuenca Jubones. El primer paso fue examinar las estaciones de cada cuenca, analizando las curvas de precipitación anual acumulada, con el fin de identificar las estaciones que presentan un comportamiento regular a lo largo del período 1975-2014. Las estaciones más regulares se comportan mediante líneas más rectas y con menores cambios en la pendiente, mientras que las estaciones irregulares muestran cambios bruscos en la pendiente de las líneas. Bajo ese criterio, se utilizaron las estaciones con curvas más regulares como estaciones de referencia para realizar un análisis de doble masa, con el objetivo de evaluar las estaciones cercanas. El gráfico de doble masa consiste en graficar a la

precipitación anual acumulada de la estación a evaluar con respecto a la de una estación de referencia cercana (OMM, 2018). Si las curvas generadas muestran un cambio de pendiente, las estaciones evaluadas son descartadas.

Los datos faltantes de las estaciones se rellenaron utilizando el método de regresión lineal simple, utilizando como base los datos de estaciones cercanas que presenten como mínimo un coeficiente de correlación de 0.7. La base de datos final consta de 17 estaciones: 3 en la cuenca Tempisque-Bebedero (Costa Rica), 1 en San Juan (Colombia), 6 en Lengupá (Colombia), 6 en Paute (Ecuador) y 1 en Jubones (Ecuador).

La segunda fase consistió en el cálculo del SPI y sus parámetros, tales como la duración de las sequías, frecuencia, la intensidad, la magnitud y la probabilidad de ocurrencia anual. Se utilizó el lenguaje de programación R y el entorno R Studio para realizar el cálculo del SPI a través de la librería “SPEI”; además se diseñaron los gráficos mediante la librería “ggplot2”. El cálculo se realizó a escalas temporales de 3, 6, 9, 12 y 15 meses, sin embargo, se seleccionaron las escalas de 3 y 12 meses, con el fin de comprender cómo el déficit de lluvia afecta la disponibilidad de agua a mediano y largo plazo, desde la disminución de la humedad del suelo hasta la reducción del nivel de las aguas subterráneas y el caudal de los ríos, propio de las sequías agrícolas e hidrológicas.

La tercera fase de la investigación estuvo enfocada en determinar la posible relación entre las sequías y algunos fenómenos oceánico-atmosféricos oscilatorios que influyen en los patrones de precipitación a escala global y regional. Se utilizaron series temporales del SPI calculados de las estaciones seleccionadas y los datos de 9 índices de teleconexión (El Niño 1+2, El Niño 3, El Niño 3.4, El Niño 4, MEI, TNI, PDO, NAO, AMO).

Para medir dicha relación se usó la regresión lineal múltiple por pasos (stepwise) y la regresión de bosques aleatorios (Random Forest). Para llevar a cabo el primero, se determinó el mejor modelo posible a través de la función “step” en la modalidad backward (hacia atrás), usando el lenguaje de programación R, la cual evalúa estadísticamente cada variable predictora y elige aquellas que mejor predicen el comportamiento de la variable dependiente. Una vez realizado lo anterior, se calcula el coeficiente de determinación ajustado R^2 para cuantificar la fuerza de la relación SPI y los índices de teleconexión. Además, se cuantificó la importancia de las variables del modelo de regresión

lineal múltiple resultante, por medio de la función “calc.relimp” del paquete “relaimpo” en R, utilizando el método “lmg”.

Para la regresión por bosques aleatorios o Random Forest, se utilizó el lenguaje de programación Python ambientado en el software “Spyder”. Se calculó el coeficiente de determinación R^2 y se cuantificó la importancia de las variables de cada índice de teleconexión.

La cuarta fase de la investigación estuvo encaminada a sintetizar la información de las fases anteriores y a la comparación de las cuencas tropicales. En esta fase se analizan las diferencias y similitudes del comportamiento de las sequías, y su relación con la teleconexión.

Capítulo II. Caracterización de las sequías

2.1. Escala Trimestral (Sequía agrícola)

2.1.1. Promedio de frecuencia y duración de las sequías

La frecuencia de eventos, duración promedio y la probabilidad de ocurrencia de las sequías de cada cuenca se muestran en la Tabla 3. Por lo general las sequías moderadas son las más frecuentes, mientras que las sequías extremas son las que presentan menor ocurrencia.

Las cuencas ecuatorianas Jubones y Paute tienen en promedio los mayores registros de sequías moderadas y de duración total, con 24 y 21 eventos respectivamente; además ambas registraron una duración total promedio de 39 meses. San Juan en Colombia y Tempisque-Bebedero en Costa Rica, son las cuencas con menor cantidad de eventos promedio en esta categoría, con 15 y 17 respectivamente. Por otro lado, Lengupá en Colombia registró 18 sequías de este tipo. Tempisque-Bebedero fue la cuenca con menor duración total promedio con 27 meses.

Respecto a las sequías severas, las cuencas Paute y Lengupá tuvieron 9 eventos en promedio, mientras que San Juan y Jubones registraron 8 y 7 eventos respectivamente. La cuenca del Tempisque-Bebedero fue la que tuvo menor cantidad de eventos severos, con un promedio cercano a 4. San Juan es la cuenca que presentó el mayor número de meses de sequía severa con un total de 44, mientras que Jubones y Tempisque-Bebedero fueron las que tuvieron menor duración, con un total de 17 y 18 meses en promedio respectivamente.

En relación con las sequías extremas, la cuenca del Tempisque-Bebedero es la que presenta mayor número de eventos promedio en esta categoría, con 5, y la que mayor duración promedio registró, con 28 meses. Paute y Lengupá registran en promedio aproximadamente 3 eventos. San Juan presentó una sequía extrema, mientras que Jubones no tuvo registro de sequías de este tipo.

La cuenca Tempisque-Bebedero tiene la particularidad de que los registros de sequías extremas superan en número a las severas. Además, las sequías extremas registraron una duración total de 28.3 meses, superando la duración total de las sequías de categoría moderada (26.7 meses) y severa (18 meses). La mayor

parte de estas sequías ocurrieron entre los años 1975 a 1987 aproximadamente, tal y como se ilustran en las Figuras 3, 4 y 5.

Tabla 3. Promedio de frecuencia, duración y probabilidad de ocurrencia anual de las sequías según el índice estandarizado de precipitación a escala temporal de 3 meses.

Cuenca	Categoría de Sequía	Frecuencia promedio. (N° de eventos)	Desviación estándar de los eventos	Duración total promedio (meses)	Desviación estándar de la duración	Probabilidad de ocurrencia anual promedio
Tempisque-Bebadero (Costa Rica)	Moderada	16.7	1.5	26.7	5.7	41.70%
	Severa	3.7	2.1	18	9.5	9.20%
	Extrema	5	1	28.3	11.5	12.50%
San Juan (Colombia)	Moderada	15	-	34	-	37.50%
	Severa	8	-	44	-	20.00%
	Extrema	1	-	4	-	2.50%
Lengupá (Colombia)	Moderada	18.3	5.7	34.8	11.1	45.80%
	Severa	8.5	4.8	26.8	11.3	21.30%
	Extrema	2.5	7.2	10.7	8	6.30%
Jubones (Ecuador)	Moderada	24	-	39	-	60.00%
	Severa	7	-	17	-	17.50%
	Extrema	0	-	0	-	0.00%
Paute (Ecuador)	Moderada	21.3	3.6	39.5	11.7	53.30%
	Severa	9	2.6	26.3	5.9	22.50%
	Extrema	2.5	1.4	7.7	3.7	6.30%

2.2. Escala anual (Sequía hidrológica)

2.2.1. Promedio de frecuencia y duración de las sequías

El número de eventos, la duración total promedio y la probabilidad de ocurrencia de sequía a escala temporal de 12 meses se muestran en la Tabla 4. Al igual que en la escala trimestral, las cuenca Paute y Jubones presentan un mayor número de sequías moderadas (12 y 11 respectivamente), además tuvieron una duración total promedio que supera a las demás cuencas. Tempisque-Bebadero ostenta el menor registro de eventos moderados, con un promedio cercano a 4, así como el menor registro de duración total, con un promedio de 13 meses. La cuenca Jubones tuvo la mayor duración total de sequías moderadas, con 62 meses.

En relación con las sequías severas, San Juan fue la cuenca que registró mayor número de eventos, con 4, además fue la que registró mayor número de meses en esta categoría (45 meses). La cuenca Lengupá tuvo en promedio 3

eventos, Paute registró 2, mientras que las cuencas Tempisque-Bebedero y Jubones tuvieron solo 1 evento en promedio.

Respecto a las sequías extremas, las cuencas Tempisque-Bebedero y Lengupá presentaron un promedio cercano a 1 de sequías extremas, con una duración total de 24 y 10 meses respectivamente. Las demás cuencas no presentaron sequías extremas.

Tabla 4. Promedio de frecuencia, duración y probabilidad de ocurrencia anual de las sequías según el índice estandarizado de precipitación a escala temporal de 12 meses.

Cuenca	Categoría de Sequía	Frecuencia promedio. (N° de eventos)	Desviación estándar de los eventos	Duración total promedio (meses)	Desviación estándar de la duración	Probabilidad de ocurrencia anual promedio
Tempisque-Bebedero (Costa Rica)	Moderada	3.7	2.1	13.3	8.4	9.20%
	Severa	0.7	0.6	9.7	8.5	1.70%
	Extrema	1.3	0.6	24.3	1.2	3.30%
San Juan (Colombia)	Moderada	7	-	32	-	17.50%
	Severa	4	-	45	-	10.00%
	Extrema	0	-	0	-	0.00%
Lengupá (Colombia)	Moderada	9.3	4.8	34.3	20.4	23.30%
	Severa	3.2	2.6	25.5	14.7	7.90%
	Extrema	0.7	0.5	9.8	7.8	1.70%
Jubones (Ecuador)	Moderada	11	-	62	-	27.50%
	Severa	1	-	9	-	2.50%
	Extrema	0	-	0	-	0.00%
Paute (Ecuador)	Moderada	12.3	3.8	42.5	17	30.80%
	Severa	1.8	0.8	25.7	15.3	4.60%
	Extrema	0.3	0.8	4.5	11	0.80%

2.3. Cuenca Tempisque-Bebedero

2.3.1. Escala Trimestral (Sequía agrícola)

Los gráficos de las figuras 3, 4 y 5 ilustran el SPI-3 de las estaciones seleccionadas en la cuenca Tempisque-Bebedero. En las 3 estaciones se identifican tendencias negativas y positivas en los valores de SPI que oscilan aproximadamente cada 10 años. El período 1975-1987 fue el más seco de todos y donde se registraron los valores de SPI más bajos, con intensidades severas y extremas principalmente. Entre los años 1987-1997 y 2005-2014 se observa una tendencia positiva del índice, donde prevalecen períodos húmedos. En el período 1997-2005 hay una ligera tendencia a SPI negativos de intensidad moderada.

En la estación Corralillo (Figura 3) se registraron 18 eventos de sequía moderada, 3 de sequía severa y 4 de sequía extrema. Los eventos moderados ocurrieron en los períodos febrero-marzo 1976, junio-julio 1980, diciembre 1981-marzo 1982, mayo-julio 1983, febrero-marzo 1984, febrero-marzo 1985, mayo 1985, noviembre 1985-enero 1986, julio 1994, noviembre 1996, setiembre-octubre 1997, junio 1998, julio 2001, setiembre-octubre 2003, junio 2004, y mayo-junio 2014. La sequías severas se generaron en los períodos de agosto 1976-abril 1978, octubre 1978-marzo 1979, y julio-agosto 1979. Los eventos extremos se registraron en los períodos de marzo-abril 1975, enero-abril 1980, agosto 1982-marzo 1983, y abril-junio 1987.

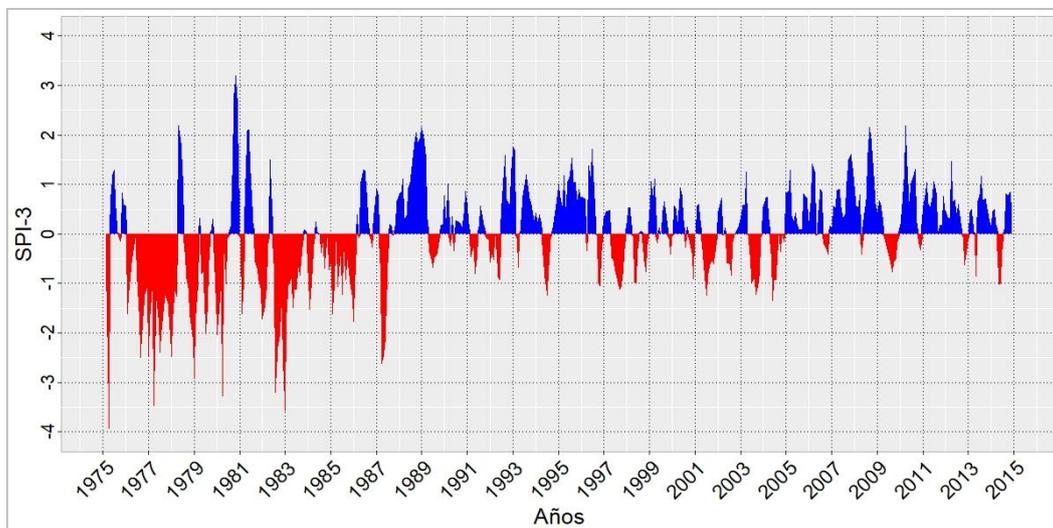


Figura 3. Índice estandarizado de precipitación a escala temporal de 3 meses de la estación Corralillo, cuenca Tempisque-Bebedero, Costa Rica.

La Figura 4, ilustra el comportamiento del SPI-3 de la estación Gramita. Se registraron 28 sequías, de las cuales 17 son moderadas, 6 severas y 5 extremas. Las sequías moderadas se identificaron en los siguientes períodos: abril 1975, julio-agosto 1975, abril 1976, abril 1978, agosto 1978, abril 1980, setiembre 1980, abril 1981, setiembre 1981, abril 1982, julio 1994, octubre-noviembre 1996, setiembre-octubre 1997, diciembre 2000, julio 2001, setiembre-noviembre 2003, y julio 2004. Las sequías severas ocurrieron en los períodos: febrero 1976, enero-febrero 1981, enero-febrero 1982, mayo-julio 1983, mayo 1984, y abril-junio 1987. Las sequías extremas se desarrollaron en los períodos: agosto-febrero 1977, abril 1977-febrero 1978, enero-febrero 1979, enero-febrero 1980 y agosto 1982-enero 1983.

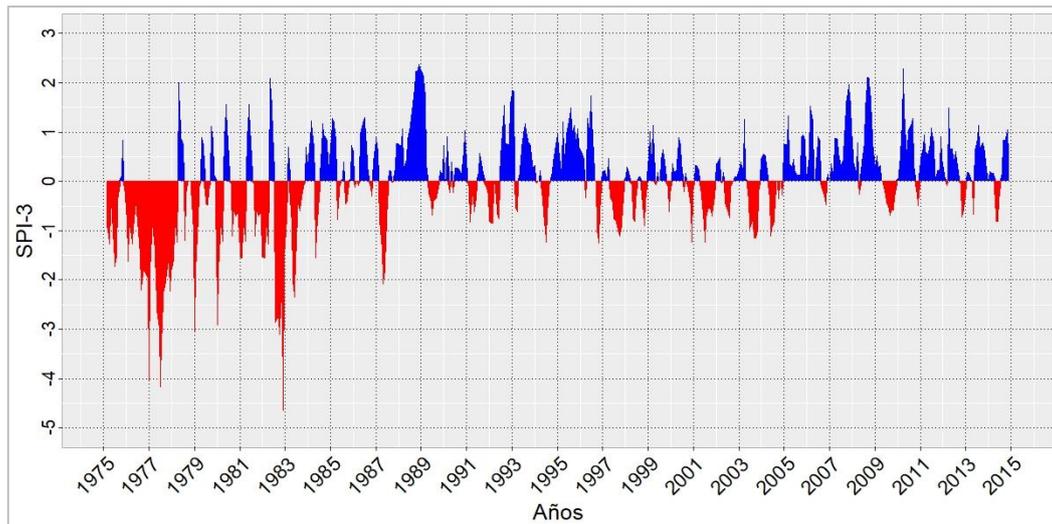


Figura 4. Índice estandarizado de precipitación a escala temporal de 3 meses de la estación Gramita, cuenca Tempisque-Bebedero, Costa Rica.

La gráfica que describe el SPI-3 de la estación La Guinea se muestra en la Figura 5. Se identificaron en total 15 sequías moderadas, 2 severas y 5 extremas. Las sequías moderadas se registraron en los períodos: agosto 1975, febrero-marzo 1976, mayo 1976, febrero-abril 1981, julio-agosto 1983, febrero-marzo 1984, marzo 1985, julio 1985, setiembre 1985, setiembre-octubre 1986, febrero 1987, noviembre 1986, diciembre 2000, octubre 2003, y julio 2004. Las sequías severas se desarrollaron en los períodos: diciembre 1978-marzo 1979 y enero-setiembre 1980. Las sequías extremas ocurrieron en los períodos: marzo-abril 1975, julio 1976-marzo 1978, marzo-abril 1982, agosto 1982-marzo 1983, y enero-abril 1986.

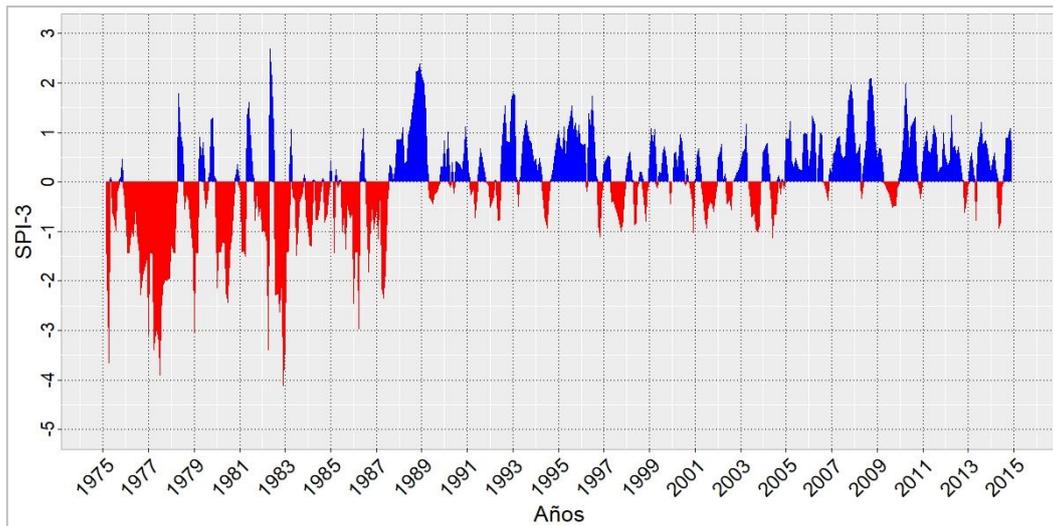


Figura 5. Índice estandarizado de precipitación a escala temporal de 3 meses de la estación La Guinea, cuenca Tempisque-Bebedero, Costa Rica.

La frecuencia de la sequía y su probabilidad de ocurrencia anual se resumen en la Tabla 5. La estación Corralillo presentó 18 sequías moderadas, mientras que Gramita y La Guinea tuvieron 17 y 15 respectivamente. Corralillo fue la estación que tuvo una duración mayor en las sequías moderadas con un total 33 meses, y la que presenta mayor probabilidad de ocurrencia anual, con 45%. Gramita es la estación con mayor número de sequías severas, con un total de 6 y tuvo una duración total de 12 meses en esta categoría; no obstante Corralillo fue la estación que tuvo la mayor duración total (29 meses), registradas en 3 sequías. Respecto a las sequías extremas, La Guinea registró 6, mientras que Gramita y Corralillo registraron 5 y 4 respectivamente; La Guinea fue la estación que registró mayor número de meses en sequía extrema, con un total de 40 meses y la que presenta mayor probabilidad de ocurrencia anual en esta categoría.

Tabla 5. Frecuencia y duración total de las sequías según el índice estandarizado de precipitación a escala temporal de 3 meses en la cuenca Tempisque-Bebedero.

Estación	Categoría de sequía	Frecuencia (N° de eventos)	Duración total (meses)	Probabilidad de ocurrencia anual (%)
Corralillo	Moderada	18	33	45.0%
	Severa	3	29	7.5%
	Extrema	4	17	10.0%
Gramita	Moderada	17	25	42.5%
	Severa	6	12	15.0%
	Extrema	5	28	12.5%
La Guinea	Moderada	15	22	37.5%
	Severa	2	13	5.0%
	Extrema	6	40	15.0%

Los eventos de mayor magnitud y duración en la cuenca Tempisque-Bebedero (Tabla 6) se registraron en el período 1976 a 1983. Estas sequías se caracterizan por ser de intensidad severa y extrema, con duraciones entre los 6 a 21 meses, y representan el período más seco de la cuenca. La sequía de mayor magnitud se registró en la estación La Guinea entre julio de 1976 y abril de 1978, la cual fue de categoría extrema, con un valor de 43.98 y una duración de 21 meses. Las tres estaciones coinciden en el registro de sequías extremas entre los años 1982-1983, con magnitudes entre los 17.25 a los 19.78.

Tabla 6. Sequías de mayor magnitud según el índice estandarizado de precipitación a escala temporal de 3 meses en la cuenca Tempisque-Bebedero.

Estación	Duración (meses)	Magnitud	Intensidad	Categoría
Corralillo	Ago 1976-Abr 1978 (21)	36.85	-1.75	Severa
	Ago 1982- Mar 1983 (8)	18.04	-2.25	Extrema
	Oct 1978-Mar 1979 (6)	10.54	-1.76	Severa
Gramita	Abr 1977-Feb 1978 (11)	25.77	-2.34	Extrema
	Ago 1982-Ene 1983 (6)	17.25	-2.88	Extrema
	Ago 1976-Feb 1977 (7)	14.85	-2.12	Extrema
La Guinea	Jul 1976-Mar 1978 (21)	43.98	-2.09	Extrema
	Ago 1982-Mar 1983 (8)	19.78	-2.47	Extrema
	Ene 1980-Set 1980 (9)	14.61	-1.62	Severa

2.3.2. Escala anual (Sequía hidrológica)

A escala temporal de 12 meses se evidencia de forma más clara la alternancia de períodos secos y húmedos en períodos de 10 años

aproximadamente. Se distingue un período muy seco entre los años 1976-1986 y otro levemente seco entre 1997-2005; y períodos húmedos entre los años 1986-1997 y 2005-2014. El período 1976-1986 se caracteriza por poseer sequías de larga duración y con intensidades extremas y severas. En el caso del período 1997-2005, se identifican valores negativos en el SPI, aunque no llega a categorizarse como sequía.

El gráfico de la Figura 6 ilustra el SPI-12 de la estación Corralillo. En ésta se detectaron 4 sequías en total, dos de categoría extrema y dos moderadas. Las sequías extremas se registraron en los períodos de setiembre 1976-mayo 1978, y julio 1982-octubre 1983. Se identificaron sequías moderadas en mayo 1985, y en el período setiembre 1985-marzo de 1986.

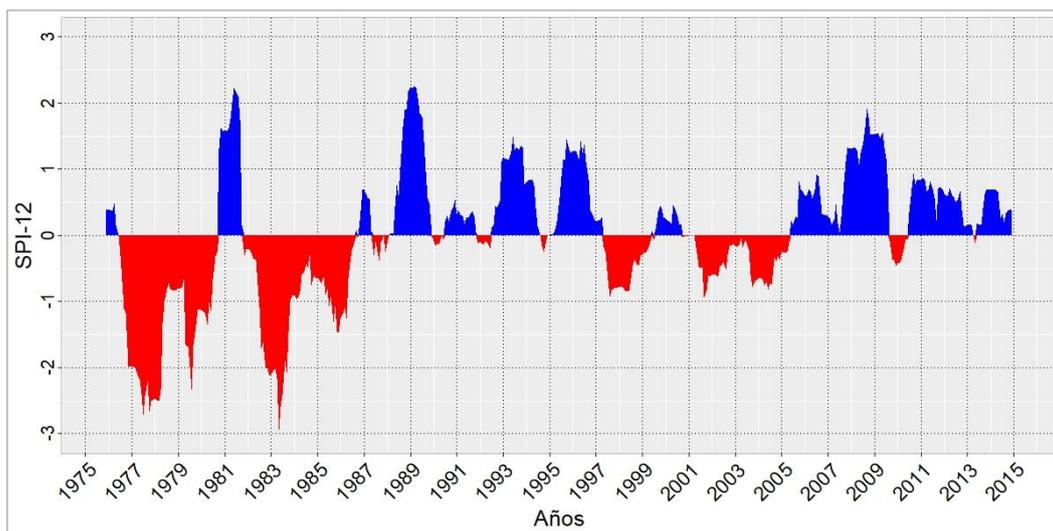


Figura 6. Índice estandarizado de precipitación a escala temporal de 12 meses de la estación Corralillo, cuenca Tempisque-Bebedero, Costa Rica.

En la Figura 7 se muestra el gráfico del SPI-12 de la estación Gramita. Se registraron en total 5 sequías, de las cuales 3 son moderadas, una severa y una extrema. Las sequías moderadas se desarrollaron en los períodos de diciembre 1975-mayo 1976, agosto 1997 y setiembre 2001. La única sequía severa se registró entre agosto de 1982 y noviembre de 1983; y la sequía extrema se identificó entre agosto de 1976 y noviembre de 1978.

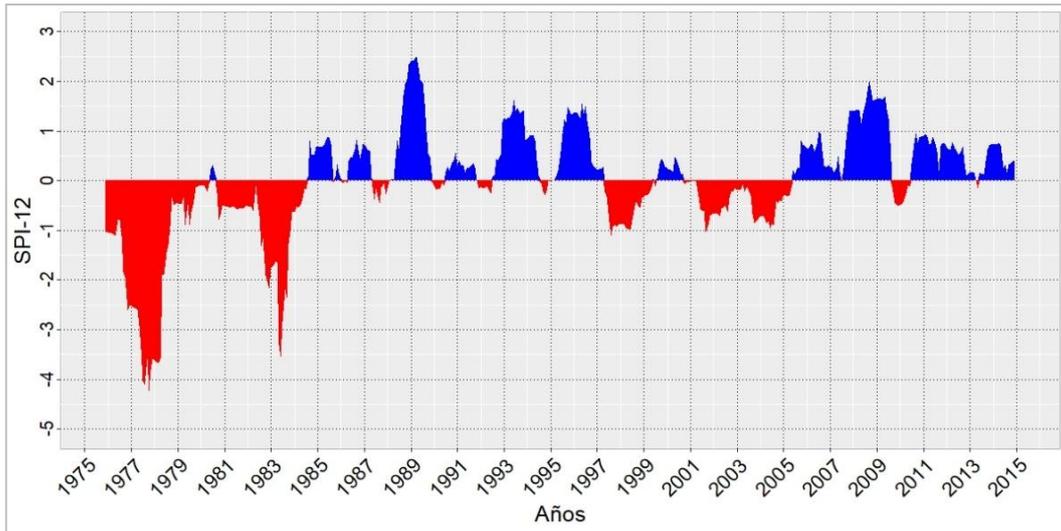


Figura 7. Índice estandarizado de precipitación a escala temporal de 12 meses de la estación Gramita, cuenca Tempisque-Bebedero, Costa Rica.

La Figura 8 describe el SPI-12 de la estación La Guinea. Se registraron en total 8 sequías, de las cuales 6 son moderadas, una severa y una extrema. Las sequías moderadas se identificaron en los períodos: setiembre 1980-abril 1981, setiembre 1985, diciembre 1985-mayo 1986, julio-agosto 1986, octubre-diciembre 1986, mayo-julio 1987. La sequía severa ocurrió entre octubre de 1982 y octubre de 1983, mientras que la extrema se desarrolló entre agosto de 1976 y agosto de 1977.

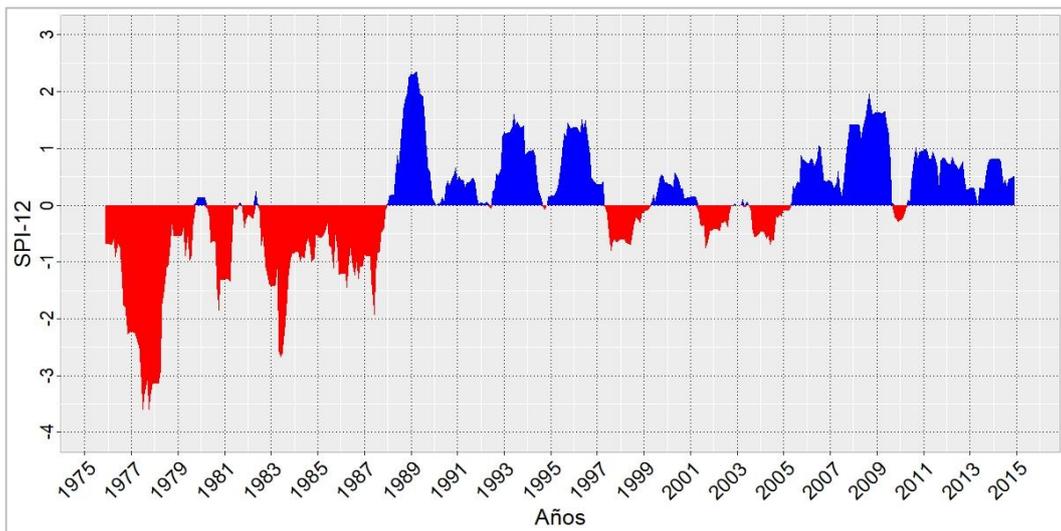


Figura 8. Índice estandarizado de precipitación a escala temporal de 12 meses de la estación La Guinea, cuenca Tempisque-Bebedero, Costa Rica.

La frecuencia de sequía, la duración total y la probabilidad de ocurrencia anual según la categoría de sequía se muestran en la Tabla 7. Todas las estaciones

tienen en común de que las sequías extremas se prolongan durante más tiempo que las sequías moderadas y severas, a pesar de que son las sequías menos frecuentes. Las sequías extremas presentan una duración total entre 23 a 25 meses, las sequías severas presentan una duración entre 13 a 16 meses, mientras que las moderadas se prolongan entre 8 a 23 meses.

Tabla 7. Frecuencia y duración total de las sequías según el índice estandarizado de precipitación a escala temporal de 12 meses en la cuenca Tempisque-Bebedero.

Estación	Categoría de sequía	Frecuencia (N° de eventos)	Duración total (meses)	Probabilidad de ocurrencia anual (%)
Corralillo	Moderada	2	9	5%
	Severa	0	0	0%
	Extrema	2	23	5%
Gramita	Moderada	3	8	7.5%
	Severa	1	16	2.5%
	Extrema	1	25	2.5%
La Guinea	Moderada	6	23	15%
	Severa	1	13	2.5%
	Extrema	1	25	2.5 %

En la Tabla 8 se observan las sequías de mayor magnitud con su respectiva intensidad y duración de acuerdo al SPI-12. La tendencia es la misma que en la escala trimestral, en la cual, las sequías de mayor magnitud ocurrieron durante la primera década de estudio. La principal sequía en cuanto a magnitud se registró en la estación La Gramita, entre agosto de 1978 a agosto 1978, con 25 meses de duración y una magnitud de 70.93. La Guinea tuvo exactamente el mismo período de sequía, pero su magnitud fue de 61.84, mientras que Corralillo tuvo la sequía de mayor magnitud entre setiembre de 1976 a mayo de 1978. Entre los años 1982-1983 las tres estaciones registran sequías con magnitudes entre los 22.13 a los 32.27.

Tabla 8. Sequías de mayor magnitud según el índice estandarizado de precipitación a escala temporal de 12 meses en la cuenca Tempisque-Bebedero.

Estación	Duración (meses)	Magnitud	Intensidad	Categoría
Corralillo	Set 1976-May 1978 (21)	45.06	-2.15	Extrema
	Jul 1982-Oct 1983 (2)	32.27	-2.02	Extrema
	Set 1985-Mar 1986 (8)	10.09	-1.26	Moderada
Gramita	Ago 1976-Ago 1978 (25)	70.93	-2.84	Extrema
	Ago 1982-Nov 1983 (16)	31.82	-1.99	Severa
	Dic 1975-May 1976 (6)	6.35	-1.06	Moderada
La Guinea	Ago 1976-Ago 1978 (25)	61.84	-2.47	Extrema
	Oct 1982-Oct 1983 (13)	22.13	-1.70	Severa
	Set 1980-Abr 1981 (8)	11.22	-1.40	Moderada

2.4. Cuenca San Juan

2.4.1. Escala trimestral (Sequía agrícola).

En la estación Pueblo Rico, según el SPI-3 (Figura 9), hubo 24 eventos de sequía en total, de las cuales 15 corresponden a eventos moderados, 8 de sequía severa y 1 de sequía extrema. Las sequías moderadas se desarrollaron en los siguientes períodos: marzo 1976, abril-mayo 1980, agosto-setiembre 1986, marzo-abril 1988, noviembre-diciembre 1989, febrero-marzo 1995, mayo 1997, diciembre 1997-febrero 1998, marzo 2002, octubre-diciembre 2002, junio-diciembre 2003, febrero 2010, julio-setiembre 2012, abril-mayo 2014, agosto-setiembre 2014. Las sequías severas fueron registradas en los períodos de julio-noviembre 1976, enero-febrero 1978, mayo 1981, enero-junio 1987, abril-agosto 1990, mayo-agosto 1991, octubre 1991-junio 1992, y marzo 2006-febrero 2007. La única sequía extrema fue detectada entre julio y octubre de 1997.

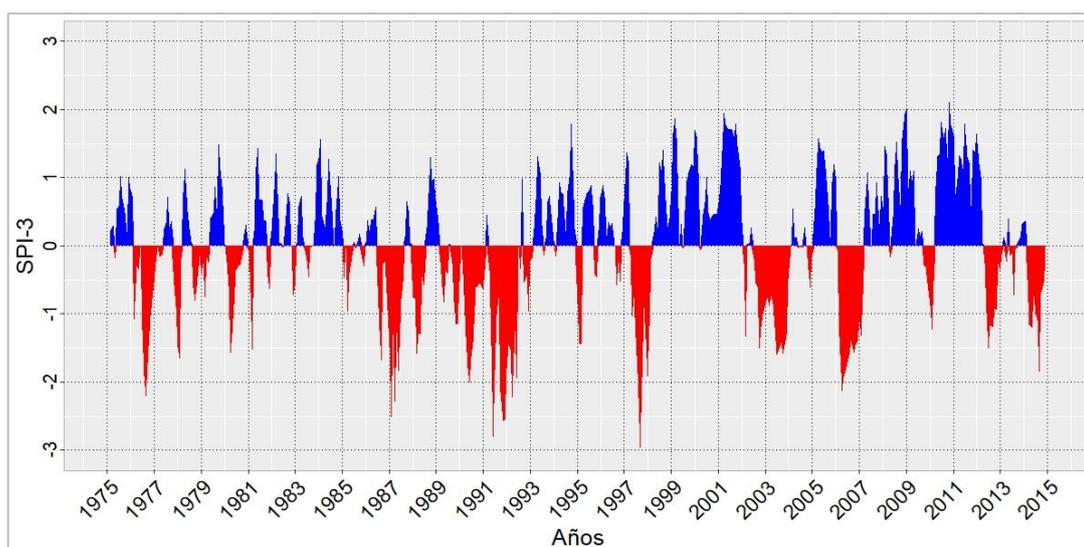


Figura 9. Índice estandarizado de precipitación a escala temporal de 3 meses de la estación Pueblo Rico, cuenca San Juan, Colombia.

La Tabla 9 muestra la frecuencia y la duración total de las sequías según su categoría. Las sequías moderadas son las más frecuentes, con un total de 15 eventos y una duración total de 34 meses. Se registraron 8 sequías severas con una duración total de total 44 meses. Solo hubo una sequía extrema, con una duración de 4 meses.

Tabla 9. Frecuencia y duración total de las sequías según el índice estandarizado de precipitación a escala temporal de 3 meses en la cuenca San Juan.

Estación	Categoría de sequía	Frecuencia (Nº de eventos)	Duración total (meses)	Probabilidad de ocurrencia anual (%)
Pueblo Rico	Moderada	15	34	37.5%
	Severa	8	44	20%
	Extrema	1	4	2.5%

Las sequías de mayor magnitud a escala de trimestral ocurrieron entre los años 1991-1992, 2003-2004 y 2006-2007 (Tabla 9). La sequía de mayor magnitud ocurrió entre marzo de 2006 a febrero de 2007, con doce meses de duración y de intensidad severa.

Tabla 10. Sequías de mayor magnitud según el índice estandarizado de precipitación a escala temporal de 3 meses en la cuenca San Juan.

Estación	Duración (meses)	Magnitud	Intensidad	Categoría
Pueblo Rico	Mar 2006-Feb 2007 (12)	18.78	-1.57	Severa
	Oct 1991-Jun 1992 (9)	17.46	-1.94	Severa
	Ene 1987-Jun 1987 (6)	10.73	-1.79	Severa

2.4.2. Escala anual (Sequía hidrológica)

El SPI a escala temporal de 12 meses de la estación Pueblo Rico se observa en el gráfico de la Figura 10. Se registraron 11 eventos de sequía, de los cuales 7 son de categoría moderada y 4 de severa; no hubo sequías extremas. Los eventos moderados se desarrollaron en los períodos: diciembre 1976-febrero 1977, abril-mayo 1977, febrero 1987, mayo 1990-febrero 1991, abril 2003-mayo 2004, abril 2013, diciembre 2014. Los eventos de sequía severa se registraron en los meses de abril-noviembre 1987, abril 1991- diciembre 1992, diciembre 1997-junio 1998, y octubre 2006-junio 2007.

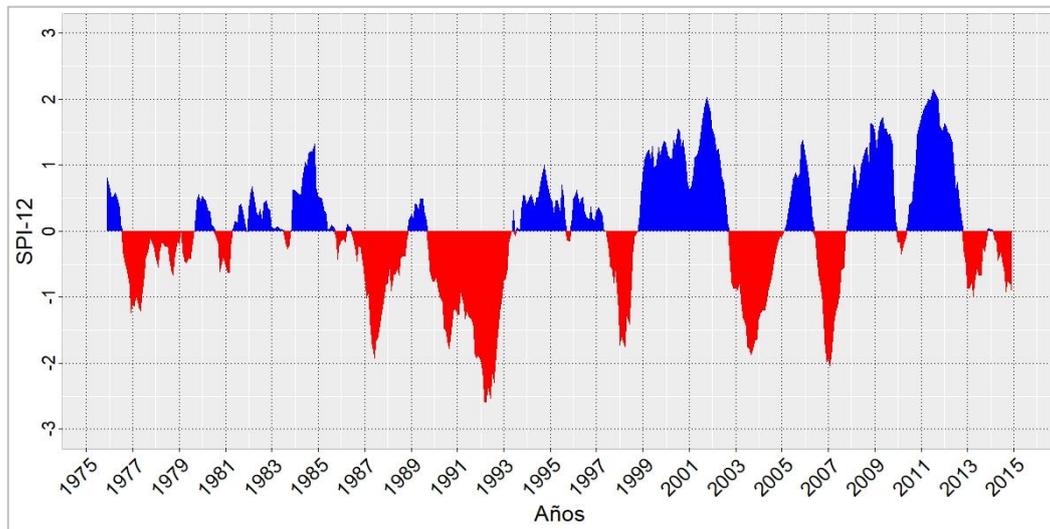


Figura 10. Índice estandarizado de precipitación a escala temporal de 12 meses de la estación Pueblo Rico, cuenca San Juan, Colombia.

Las sequías moderadas tienen una duración total de 32 meses en 7 eventos registrados (Tabla 11). Los eventos de sequía severa tienden a tener mayor duración a pesar de que son menos frecuentes que las sequías moderadas, registrando un total de 45 meses. No hay eventos de sequía extrema registrados.

Tabla 11. Frecuencia y duración total de las sequías según el índice estandarizado de precipitación a escala temporal de 12 meses en la cuenca San Juan.

Estación	Categoría de sequía	Frecuencia (N° de eventos)	Duración total (meses)	Probabilidad de ocurrencia anual (%)
Pueblo Rico	Moderada	7	32	17.5%
	Severa	4	45	10.0%
	Extrema	0	0	0.0%

A escala anual, las sequías de mayor magnitud ocurrieron entre los años 1991-1992, 2003-2004 y 2006-2007 (Tabla 12). La sequía más importante se desarrolló entre abril de 1991 y diciembre de 1992, con una magnitud de 37.89 y de intensidad severa.

Tabla 12. Sequías de mayor magnitud según el índice estandarizado de precipitación a escala temporal de 12 meses en la cuenca San Juan.

Estación	Duración (meses)	Magnitud	Intensidad	Categoría
	Abr 1991-Dic 1992 (21)	37.89	-1.80	Severa
Pueblo Rico	Abr 2003-May 2004 (14)	20.47	-1.46	Moderada
	Oct 2006-Jun 2007 (9)	14.27	-1.59	Severa

2.5. Cuenca Lengupá

Para la caracterizar el comportamiento de la sequía en la cuenca Lengupá, se seleccionaron las estaciones Rondón, Cedros y Piedra Campana, los cuales se encuentran a diferentes altitudes (2120, 1600 y 450 msnm respectivamente). Estas estaciones son representativas de la cuenca desde la parte alta hasta el sector más bajo.

2.5.1. Escala trimestral (Sequía agrícola)

En la Figura 11 se ilustra la serie temporal del SPI-3 de la estación Rondón. El gráfico muestra una variabilidad constante del índice entre períodos secos y húmedos, no obstante, es de destacar el período 1985-1987 por su intensidad y extensión, llegando a valores de SPI de -3.5. Destacan también los períodos 1977-1978, 1988 y 1998-1999. Se registraron un total de 34 sequías, de las cuales 20 son sequías moderadas, 11 severas y 2 extremas.

Las sequías moderadas se desarrollaron en los períodos: marzo 1977, agosto 1977, marzo 1980, agosto-octubre 1981, enero 1983, enero 1986, junio 1989, mayo-julio 1992, setiembre 1995, mayo-junio 1997, julio-setiembre 1999, abril-julio 2001, febrero 2003, agosto 2003, julio-agosto 2005, marzo 2007, julio 2009, setiembre 2009, febrero 2010, octubre-noviembre 2014. Los períodos severos se registraron en los siguientes años: diciembre 1977-febrero 1978, marzo 1979, diciembre 1980-enero 1981, noviembre 1983, febrero-abril 1985, noviembre 1985, marzo-junio 1988, febrero 1992, febrero 1995, octubre 2010, y octubre 2012-enero 2013. Las dos sequías extremas ocurrieron en los períodos: marzo 1986-enero 1987 y noviembre 1998-enero 1999.

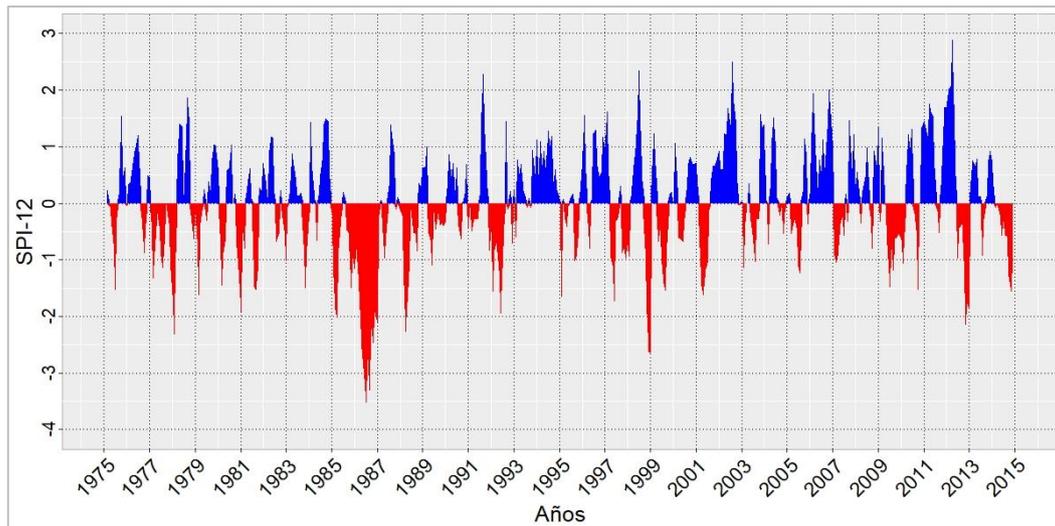


Figura 11. Índice estandarizado de precipitación a escala temporal de 3 meses de la estación Rondón, cuenca Lengupá, Colombia.

El gráfico del SPI-3 de la estación Cedros se observa en la Figura 12. El índice muestra un período muy seco en los dos primeros años, llegando a valores de intensidad extrema. Hay una tendencia de períodos de sequía de intensidad moderada, con presencia de períodos de mayor intensidad entre los años 1984-1985, 2002-2003, y 2009-2010. Se registraron un total de 31 eventos, de los cuales 23 son de categoría moderada, 4 son severas y 4 extremas.

Las sequías moderadas se desarrollaron en los períodos: marzo 1976, mayo-junio 1981, julio-agosto 1982, diciembre 1982-enero 1983, enero 1986, enero 1987, marzo 1988, abril-junio 1989, marzo 1992, noviembre 1997-febrero 1998, setiembre 1998, febrero 2000, abril 2000, marzo-abril 2001, setiembre 2001, octubre-noviembre 2003, abril 2004, setiembre-octubre 2006, abril-mayo 2008, junio 2009, noviembre-diciembre 2009, octubre-noviembre 2010, agosto 2011, junio-julio 2013. Los períodos severos se registraron en los períodos: diciembre 1984, febrero-mayo 1985, octubre 2002-febrero 2003, y mayo-julio 2014. Las sequías extremas fueron registradas en los siguientes períodos: abril-noviembre 1975, mayo-agosto 1976, mayo 1984 y setiembre 1998.

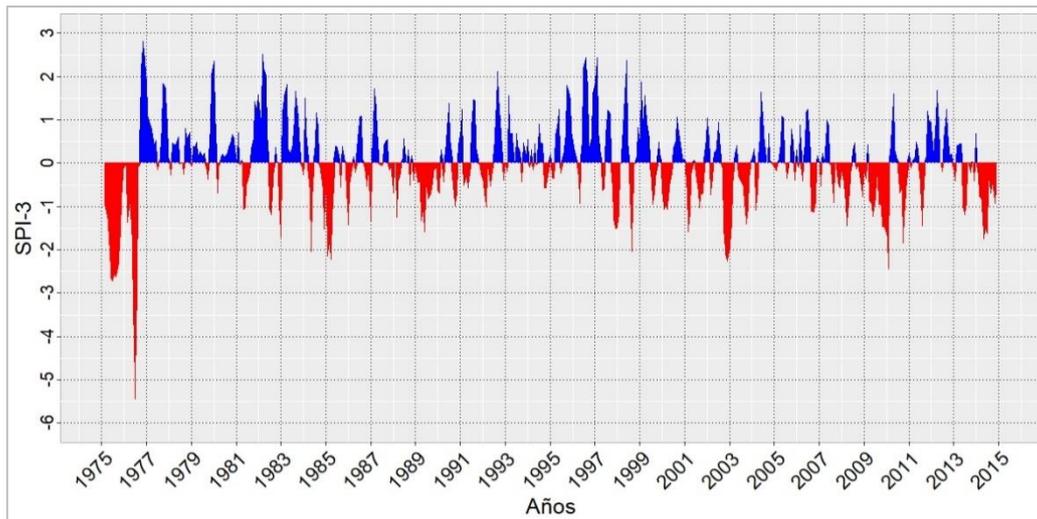


Figura 12. Índice estandarizado de precipitación a escala temporal de 3 meses de la estación Cedros, cuenca Lengupá, Colombia.

La Figura 13 muestra la serie temporal del SPI-3 de la estación Piedra Campana. En el gráfico se observan valores de SPI con mucha variabilidad positiva y negativa, en la cual se destacan períodos secos entre los años 1984-1986, 1988, 2001, 2009-2011. Se registraron 16 sequías moderadas, 13 severas y una extrema, para un total de 30 sequías.

Las sequías moderadas se desarrollaron en los siguientes períodos: agosto-setiembre 1976, febrero 1978, enero-febrero 1979, julio 1982, julio 1983, febrero-marzo 1986, setiembre-noviembre 1990, mayo-agosto 1992, julio 2001, noviembre-diciembre 2002, febrero 2003, setiembre 2006, marzo-abril 2008, noviembre 2009-febrero 2010, abril 2011, junio-agosto 2011, y julio 2014. Las sequías severas ocurrieron en los períodos: julio 1983, febrero-abril 1988, abril-junio 1989, diciembre 1992, setiembre-octubre 1995, octubre 1997, enero 1998, enero-marzo 2001, mayo-julio 2009, agosto-noviembre 2010, octubre-noviembre 2012, junio-agosto 2013, octubre-diciembre 2014. La única sequía extrema se registró en mayo de 1984.

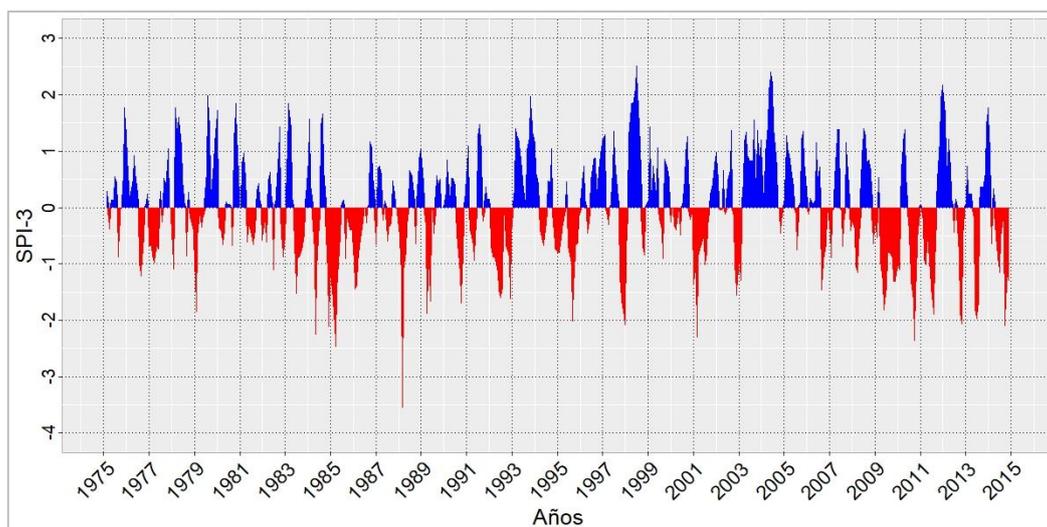


Figura 13. Índice estandarizado de precipitación a escala temporal de 3 meses de la estación Piedra Campana, cuenca Lengupá, Colombia.

La Tabla 13 resume la frecuencia y duración total de las sequías según su categoría, así como su respectiva probabilidad de ocurrencia anual. En relación a las sequías moderadas, la estación Cedros fue la que registró mayor número de eventos y la que obtuvo la mayor duración total (42 meses), mientras que Piedra Campana fue la estación con menor cantidad de eventos moderados. El mayor registro de eventos y duración total de sequías severas lo obtuvo la estación Piedra Campana, con un total 16 eventos y una duración de 38 meses. Cedros fue la estación con mayor número de sequías extremas, con 4.

Tabla 13. Frecuencia y duración total de las sequías según el índice estandarizado de precipitación a escala temporal de 3 meses en la cuenca Lengupá.

Estación	Categoría de sequía	Frecuencia (N° de eventos)	Duración total (meses)	Probabilidad de ocurrencia anual (%)
Rondón	Moderada	20	32	50%
	Severa	11	23	27.5%
	Extrema	2	14	5%
Cedros	Moderada	23	42	57.%
	Severa	4	13	10%
	Extrema	4	14	10%
Piedra Campana	Moderada	16	31	40%
	Severa	13	38	32.5%
	Extrema	1	1	2.5 %

La Tabla 14 resume los eventos de mayor magnitud en la cuenca. La estación Rondón registró la sequía de mayor magnitud, con un valor de 27.12, la

cual fue categorizada de intensidad extrema, que se desarrolló entre marzo de 1986 y enero 1987. En la estación Cedros, las sequías de mayor magnitud ocurrieron entre los años 1975-1976 y 2003-2003 con valores de 17.84, 14.23 y 9.53. La estación Piedra Campana registró las sequías de mayor magnitud entre los años 1984-1985, 1997-1998 y 2010, con magnitudes de 10.68, 6.98 y 6.63 respectivamente.

Tabla 14. Sequías de mayor magnitud según el índice estandarizado de precipitación a escala temporal de 3 meses en la cuenca Lengupá.

Estación	Duración (meses)	Magnitud	Intensidad	Categoría
Rondón	Mar 1986-Ene 1987 (11)	27.12	-2.47	Extrema
	Nov 1998-Ene 1999 (3)	7.22	-2.41	Extrema
	Oct 2012-Ene 2013 (4)	6.82	-1.70	Severa
Cedros	Abr 1975-Nov 1975 (8)	17.84	-2.23	Extrema
	May 1976-Ago 1976 (4)	14.23	-3.56	Extrema
	Oct 2002-Feb 2003 (5)	9.53	-1.91	Severa
Piedra Campana	Dic 1984-May 1985 (6)	10.68	-1.78	Severa
	Oct 1997-Ene 1998 (4)	6.98	-1.75	Severa
	Ago 2010-Nov 2010 (4)	6.63	-1.66	Severa

2.5.2. Escala anual (Sequía hidrológica)

En la estación Rondón, el SPI-12 (Figura 14) evidencia un período seco muy intenso y prolongado entre los años 1985-1990. Los demás períodos de sequía son de intensidad leve y moderada, de corta duración. Se registraron en total 9 eventos moderados, 3 severos y una sequía extrema.

Las sequías moderadas se identificaron en los períodos: julio 1977, setiembre-octubre 1981, agosto 1988-enero 1989, febrero 1993, diciembre 1997-marzo 1998, abril 2000, enero-abril 2010, y diciembre 2014. Se identificaron sequías severas en los períodos: diciembre 1977-marzo 1978, julio-octubre 1999 y abril 2013. La sequía extrema ocurrió entre octubre de 1985 y julio 1987.

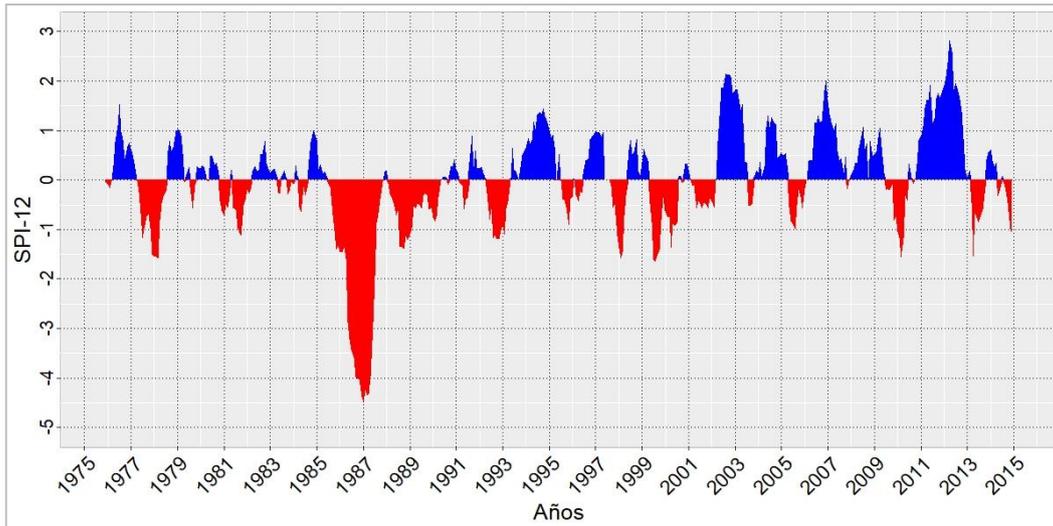


Figura 14. Índice estandarizado de precipitación a escala temporal de 12 meses de la estación Rondón, cuenca Lengupá, Colombia.

En gráfico de la Figura 15 ilustra el SPI-12 de la estación Cedros. Se identifica un período muy intenso entre los años 1976-1977, con valores inferiores de -4. Otros períodos secos importantes se identifican entre los años 1985-1986, 1989-1990, 2000-2004, 2008-2011, 2013-2014. Se registraron un total de 15 sequías, de las cuales 12 son de categoría moderada, 2 severas y 1 es extrema.

Las sequías moderadas ocurrieron en los siguientes períodos: febrero 1985, abril 1985, agosto-setiembre 1985, noviembre 1985, junio 1989-abril 1990, abril-mayo 2000, setiembre-noviembre 2001, enero-febrero 2003, marzo-abril 2004, mayo-junio 2008, y julio-agosto 2011. Las sequías severas se desarrollaron en los períodos: junio 2009- abril 2010 y marzo-diciembre 2014. La única sequía extrema se registró entre diciembre 1975 y noviembre de 1976.

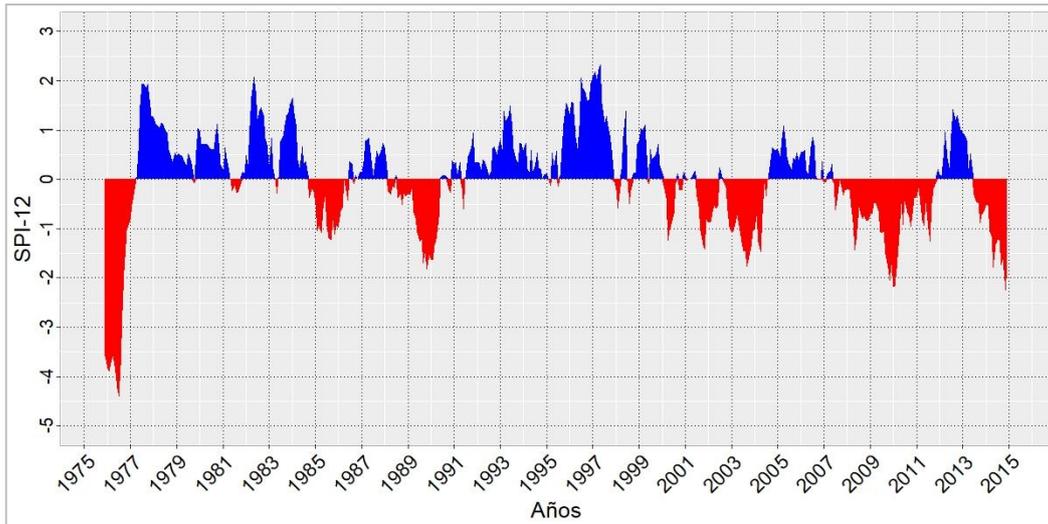


Figura 15. Índice estandarizado de precipitación a escala temporal de 12 meses de la estación Cedros, cuenca Lengupá, Colombia.

El gráfico de la Figura 16 representa el SPI-12 de la estación Piedra Campana. La figura muestra algunos períodos secos bien marcados, tales como los de los años 1982-1987, 1992-1993, 1995-1996, 2001-2002, 2009-2012 y 2013-2014. Se registraron 16 sequías en total, de las cuales 8 son moderadas y 8 son severas.

Las sequías moderadas se identificaron en los períodos: abril-junio 1977, agosto 1986, abril-junio 1988, mayo 1991, agosto 1995-enero 1996, abril-junio 1996, julio-noviembre 2001 y abril 2013. Las sequías severas se registraron en abril-mayo 1984, febrero-abril 1985, julio 1985-junio 1986, julio 1992-marzo 1993, julio 2009-abril 2010, marzo-octubre 2011, julio-setiembre 2013, y diciembre 2014.

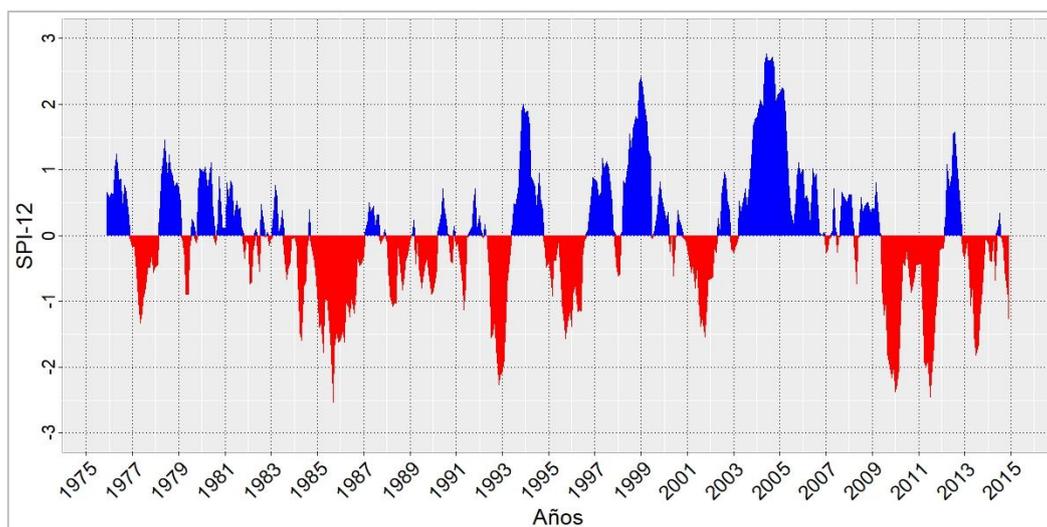


Figura 16. Índice estandarizado de precipitación a escala temporal de 12 meses de la estación Piedra Campana, cuenca Lengupá, Colombia.

La Tabla 15 muestra la frecuencia y duración de los eventos de sequía según su categoría, de acuerdo al SPI-12. La estación Cedros fue la que registró más sequías moderadas, con un total de 12 y una duración total de 36 meses; en la estación Rondón hubo 9 sequías, con una duración total de 35 meses; por su parte, Piedra Campana registró 8 sequías moderadas y una duración total de 23 meses. Respecto a las sequías severas, Piedra Campana fue la estación que registró mayor número de eventos, con 8, y la que tuvo mayor duración total, con 49 meses; mientras que las estaciones Rondón y Cedros registraron 3 y 2 sequías severas respectivamente. Se identificaron sequías extremas en las estaciones Rondón y Cedros, con 1 evento cada una; por otro lado, Piedra Campana no registró sequías extremas.

Tabla 15. Frecuencia y duración total de las sequías según el índice estandarizado de precipitación a escala temporal de 12 meses en la cuenca Lengupá.

Estación	Categoría de sequía	Frecuencia (N° de eventos)	Duración total (meses)	Probabilidad de ocurrencia anual (%)
Rondón	Moderada	9	35	22.5
	Severa	3	8	7.5
	Extrema	1	17	2.5
Cedros	Moderada	12	36	30
	Severa	2	21	5
	Extrema	1	12	2.5
Piedra Campana	Moderada	8	23	20
	Severa	8	49	20
	Extrema	0	0	0

La Tabla 16 muestra las sequías de mayor magnitud, con su respectiva intensidad y categoría. Rondón fue la estación que registró la sequía de mayor magnitud, con un valor de 65.27, la cual se registró entre octubre de 1985 y julio de 1987, de categoría extrema. En la estación Cedros, la sequía más importante en cuanto magnitud se registró entre diciembre de 1975 y noviembre de 1976, con una magnitud de 40.34, de categoría extrema. En Piedra Campana, la sequía de mayor magnitud ocurrió entre julio de 1985 y junio de 1986, con un valor de 18.32, y de categoría severa. Entre los años 1985 y 1987, las estaciones Rondón y Piedra Campana registraron las sequías de magnitud; también coinciden las estaciones Cedros y Piedra Campana en el registro de sequías severas entre los años 2009-2010.

Tabla 16. Sequías de mayor magnitud según el índice estandarizado de precipitación a escala temporal de 12 meses en la cuenca San Juan.

Estación	Duración (meses)	Magnitud	Intensidad	Categoría
Rondón	Oct 1985-Jul 1987 (22)	65.27	-2.97	Extrema
	Ago 1988-Ene 1989 (6)	7.52	-1.25	Moderada
	Jul 1999-Oct 1999 (4)	6.16	-1.54	Severa
Cedros	Dic 1975-Nov 1976 (12)	40.34	-3.36	Extrema
	Jun 2009-Abr 2010 (11)	17.57	-1.60	Severa
	Jun 1989-Abr 1990 (11)	15.96	-1.45	Moderada
Piedra Campana	Jul 1985-Jun 1986 (12)	18.32	-1.53	Severa
	Jul 2009-Abr 2010 (10)	18.09	-1.81	Severa
	Jul 1992-Mar 1993 (9)	15.93	-1.77	Severa

2.6. Cuenca Paute

Para caracterizar las sequías en la cuenca del Paute se seleccionaron las estaciones El Labrado, Gualaceo y Río Mazar Rivera, las cuales se ubican en diferentes altitudes (3424, 2230 y 1964 msnm respectivamente). Estas estaciones son representativas de la parte alta, media y baja de la cuenca Paute.

2.6.1. Escala trimestral (Sequía agrícola)

La Figura 17 muestra el SPI-3 de la estación El Labrado. En el gráfico se observan períodos secos importantes entre los años 1985-1987, 1990-1992, 2003-2004, 2005-2007 y 2010-2014. Se registraron un total de 29 eventos, de las cuales 19 son de sequía moderada, 7 de severa y 3 de extrema. Los eventos moderados se desarrollaron en los siguientes períodos: enero 1978, enero 1979, julio 1979, abril

1982, agosto 1983, noviembre 1985, agosto 1986, diciembre 1987, julio 1988, enero-abril 1991, junio-agosto 1992, febrero-marzo 1995, setiembre 1995, enero 1997, setiembre-octubre 2003, julio-octubre 2006, mayo 2009, mayo 2010, y febrero-mayo 2013. Las sequías severas se detectaron en los períodos: noviembre-diciembre 1979, noviembre 1981, diciembre 1989-febrero 1990, diciembre 2000, febrero-abril 2003, abril-noviembre 2012, y octubre 2013-febrero 2014. Las sequías extremas se registraron en los siguientes períodos: febrero a julio 1985, setiembre-noviembre 2005, y setiembre- diciembre 2010.

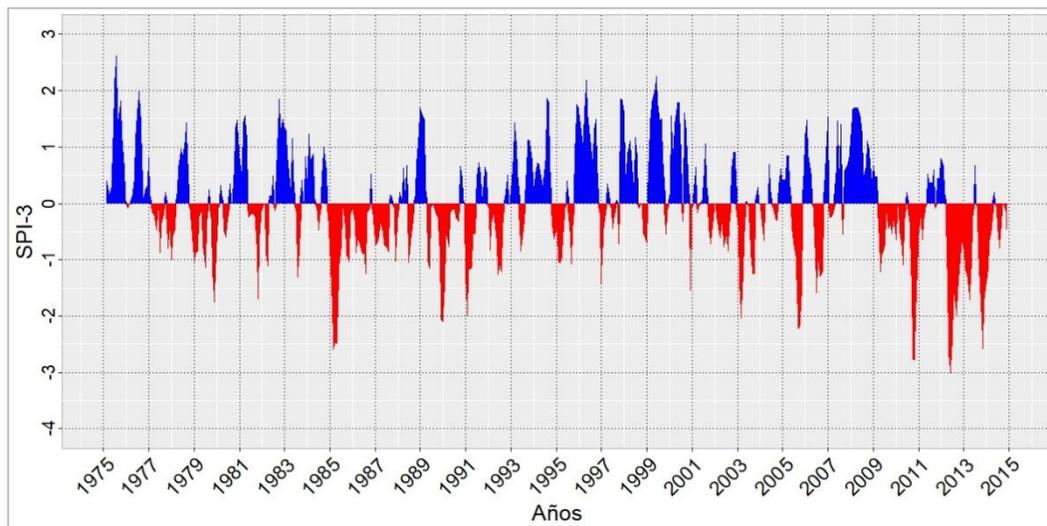


Figura 17. Índice estandarizado de precipitación a escala temporal de 3 meses de la estación El Labrado, cuenca Paute, Ecuador.

El gráfico de la Figura 18 representa el SPI-3 de la estación Gualaceo. Destacan períodos secos entre los años 1979-1981 y 1984-1988, donde se registran eventos recurrentes de sequía. En total se registraron 34 eventos, de las cuales 19 corresponden a sequías moderadas, 14 a sequías severas y 1 de sequía extrema. Las sequías moderadas se desarrollaron en los siguientes períodos: mayo 1977, noviembre 1978, abril 1982, julio 1985, noviembre-diciembre 1985 diciembre 1986, febrero 1987, marzo 1988, abril 1991, febrero 1992, mayo-julio 1992, abril-junio 1997, marzo-abril 2001, agosto-setiembre 2002, julio 2005, julio 2006, marzo 2007, agosto 2009-marzo 2010 y setiembre 2012. Se detectaron sequías severas en los siguientes períodos: diciembre 1977-febrero 1978, agosto-diciembre 1979, mayo-julio 1980, mayo- junio 1981, julio-octubre 1983, marzo-mayo 1985, junio 1989, mayo-julio 1990, octubre-noviembre 1992, febrero-mayo 1995, setiembre-octubre 1995, diciembre 2000-enero 2001, y septiembre 2005. La única sequía extrema se registró en el período de agosto 1987 a enero de 1988.

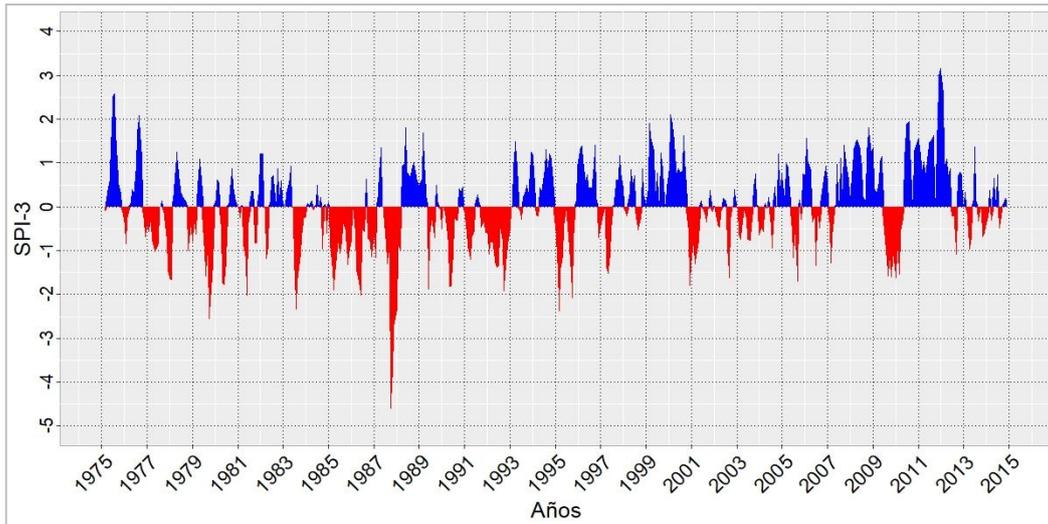


Figura 18. SPI-3 Índice estandarizado de precipitación a escala temporal de 3 meses de la estación Gualaceo, cuenca Paute, Ecuador.

La Figura 19 representa el SPI-3 de la estación Río Mazar Rivera. El gráfico destaca por la alta variabilidad entre períodos secos y húmedos. Sin embargo, se observan períodos secos importantes entre los años 1975-1976, 1978-1979, 1985, 2005, 1991-1992, y 2009-2010, donde se identifican valores de SPI extremos. En esta estación se registraron 20 eventos de sequía moderada, 7 de sequía severa y 4 de extrema. Los eventos de sequía moderada ocurrieron en los períodos: diciembre 1978-abril 1979, enero 1984, diciembre 1985, junio-agosto 1986, junio-julio 1987, junio-setiembre 1988, octubre 1989, abril-mayo 1991, febrero 1992, setiembre 1993, marzo 1995, junio 1996, diciembre 1996-enero 1997, julio-agosto 1999, marzo 2002, julio-setiembre 2002, febrero 2004, mayo 2006, diciembre 2008 y setiembre-octubre 2010. Los eventos de sequía severa se desarrollaron en los siguientes períodos: enero-abril 1976, junio-octubre 1979, noviembre 1980-marzo 1981, marzo-junio 1985, julio 1993, junio 1997, y noviembre 2009-febrero 2010. Las sequías extremas se registraron en los períodos: setiembre-diciembre 1991, diciembre 1999, setiembre-noviembre 2005 y marzo-junio 2009.

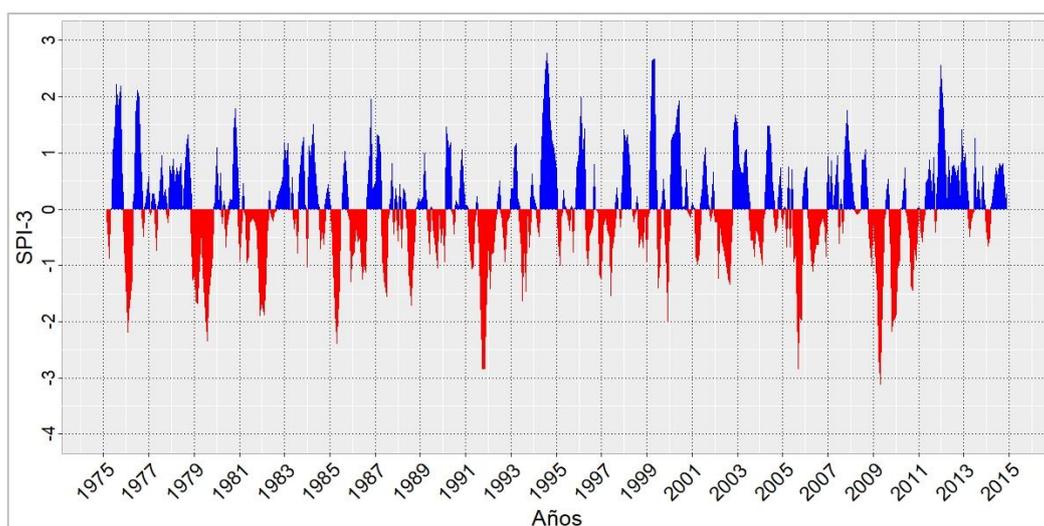


Figura 19. Índice estandarizado de precipitación a escala temporal de 3 meses de la estación Río Mazar Rivera, cuenca Paute, Ecuador.

La frecuencia de sequía, la duración total y probabilidad de ocurrencia anual se muestran en la Tabla 17. Las estaciones El Labrado y Gualaceo tuvieron 19 eventos de sequía moderada, con una duración 32 y 33 meses respectivamente; mientras que la estación Río Mazar Rivera registró 20 sequías moderadas, con una duración total de 35 meses. Gualaceo es la estación que presenta la mayor frecuencia y duración total de sequías severas, con 14 eventos 37 meses de duración. Respecto a las sequías extremas, la estación Río Mazar Rivera registró 4 eventos y El Labrado tuvo 3, ambas con una duración total de 12 meses; por su parte Gualaceo registró una sequía extrema de 6 meses de duración.

Tabla 17. Frecuencia y duración total de las sequías según el índice estandarizado de precipitación a escala temporal de 3 meses en la cuenca Paute.

Estación	Categoría de sequía	Frecuencia (N° de eventos)	Duración total (meses)	Probabilidad de ocurrencia anual (%)
El Labrado	Moderada	19	32	47.5%
	Severa	7	23	17.5%
	Extrema	3	12	7.5%
Gualaceo	Moderada	19	33	47.5%
	Severa	14	37	35%
	Extrema	1	6	2.5%
Río Mazar Rivera	Moderada	20	35	50%
	Severa	7	24	17.5%
	Extrema	4	12	10%

Las sequías de mayor magnitud junto a su respectiva intensidad y categoría se muestran en la Tabla 18. La estación Gualaceo es la que registra la

sequía de mayor magnitud con un valor de 15.96, entre agosto de 1987 y enero de 1988, de categoría extrema; seguido de cerca, El Labrado tuvo una sequía de 15.62, que ocurrió entre abril y noviembre de 2012, de intensidad severa. Por su parte, Río Mazar Rivera tuvo la sequía de mayor magnitud entre marzo y junio de 2009, con un valor de 9.24 y de categoría extrema. Las estaciones Gualaceo y Río Mazar Rivera tienen períodos de sequía en común en la segunda mitad del año 1979, de intensidad moderada y severa respectivamente.

Tabla 18. Sequías de mayor magnitud según el índice estandarizado de precipitación a escala temporal de 3 meses en la cuenca Paute.

Estación	Duración (meses)	Magnitud	Intensidad	Categoría
El Labrado	Abr 2012-Nov 2012 (8)	15.62	-1.95	Severa
	Feb 1985-Jun 1985 (5)	10.28	-2.06	Extrema
	Oct 2013-Feb 2014 (5)	8.87	-1.77	Severa
Gualaceo	Ago 1987-Ene 1988 (6)	15.96	-2.66	Extrema
	Ago 2009-Mar 2010 (8)	10.86	-1.36	Moderada
	Ago 1979-Dic 1979 (5)	8.74	-1.75	Severa
Río Mazar Rivera	Mar 2009-Jun 2009 (4)	9.24	-2.31	Extrema
	Set 1991-Dic 1991 (4)	9.19	-2.30	Extrema
	Jun 1979-Oct 1979 (5)	8.32	-1.66	Severa

2.7.1. Escala anual (Sequía Hidrológica)

La serie temporal que representa el SPI-12 de la estación El Labrado se visualiza en la Figura 20. Se observan anomalías negativas en los períodos 1979-1980, 1985-1987, 1989-1993, 2002-2004 y 2009-2014. Se registraron 13 eventos de sequía, de los cuales 11 son de categoría moderada y 2 son severas. No hubo eventos de categoría extrema.

Las sequías moderadas se registraron en los siguientes períodos: noviembre-diciembre 1979, junio 1986, agosto 1986, enero 1987, diciembre 1987, febrero-setiembre 1990, setiembre 1995, octubre 2003-enero 2004, abril 2010, octubre 2010-junio 2011 y julio 2012. Las sequías severas ocurrieron en los períodos: marzo 1985-marzo 1986 y setiembre 2012-setiembre 2014.

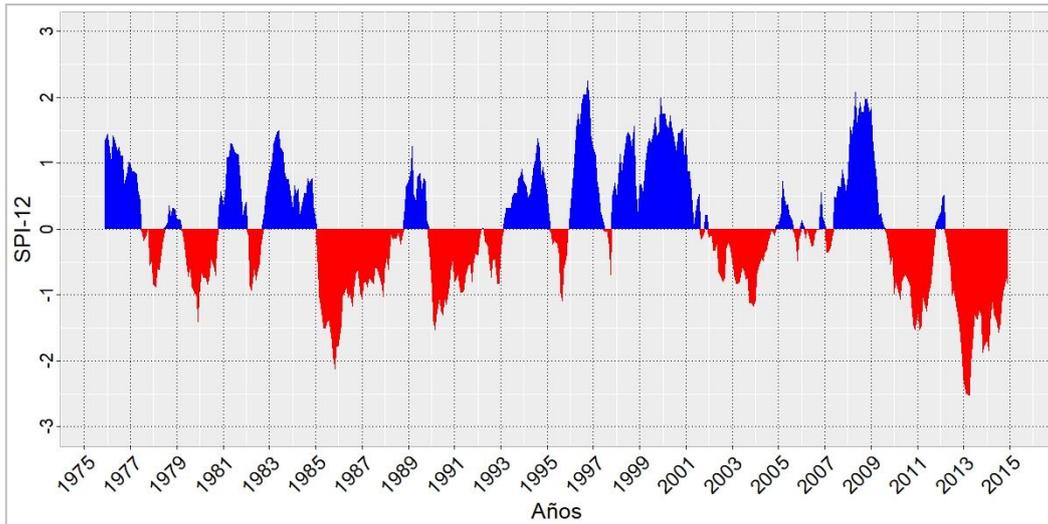


Figura 20. Índice estandarizado de precipitación a escala temporal de 12 meses de la estación El Labrado, cuenca Paute, Ecuador.

La serie temporal del SPI 12 de la estación Gualaceo se observa en la Figura 21. Las principales anomalías negativas del SPI se encuentran en los períodos 1977-1981, 1983-1988, 1995, 2001-2004 y 2010. En esta estación se contabilizaron 12 sequías, de las cuales 11 son de categoría moderada y 1 de categoría severa. Los períodos de sequía moderada son los siguientes: noviembre 1977-febrero 1978, diciembre 1979, mayo-julio 1980, mayo 1985-febrero 1987, noviembre 1987-enero 1988, marzo-junio 1988, febrero 1991, diciembre 1991-enero 1992, mayo 1992-febrero 1993, agosto-octubre 2001, y marzo-junio 2010. La única sequía severa tuvo lugar en el período entre octubre y diciembre de 1995.

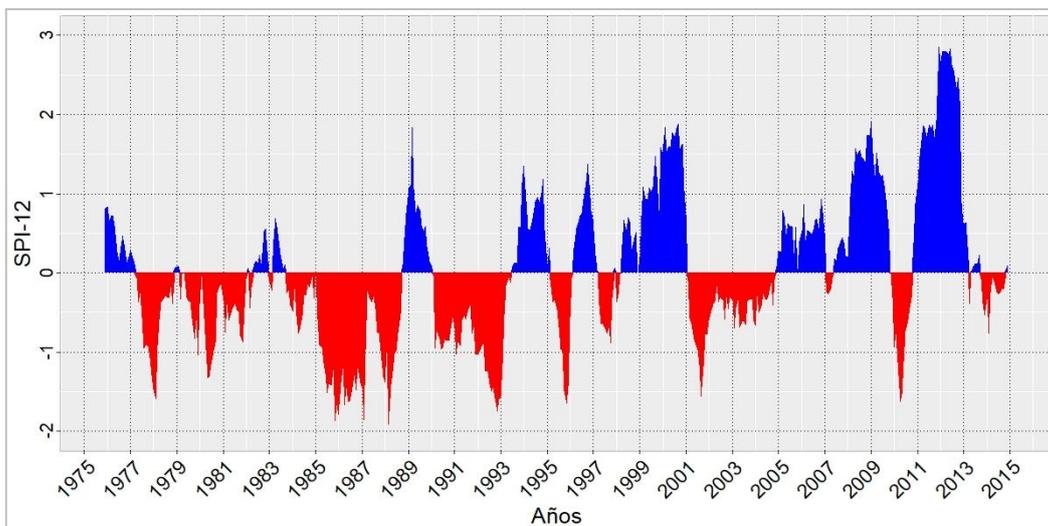


Figura 21. Índice estandarizado de precipitación a escala temporal de 12 meses de la estación Gualaceo, cuenca Paute, Ecuador.

El SPI-12 de la estación Río Mazar Rivera (Figura 22) muestra muchas oscilaciones entre períodos secos y húmedos. Los principales períodos secos se agrupan en los años 1979-1980, 1981-1982, 1985-1986, 1991-1992, 2002, 2005-2007 y 2009-2011. Se registraron un total de 23 sequías, de las cuales 20 son de categoría moderada y 3 son severas.

Las sequías moderadas ocurrieron en los períodos: noviembre 1981, enero-julio 1982, setiembre 1982, abril-julio 1985, diciembre 1985, agosto 1986, diciembre 1988, mayo 1989, marzo-abril 1994, abril 1997, julio 1997, setiembre-octubre 1997, agosto-octubre 2002, diciembre 2002, octubre-diciembre 2005, febrero-agosto 2006, diciembre 2006, julio-octubre 2010, diciembre 2010, y junio 2010. Las sequías severas ocurrieron en los siguientes períodos: junio 1979-mayo 1980. Setiembre 1991-agosto 1992, y mayo 2009-abril 2010.

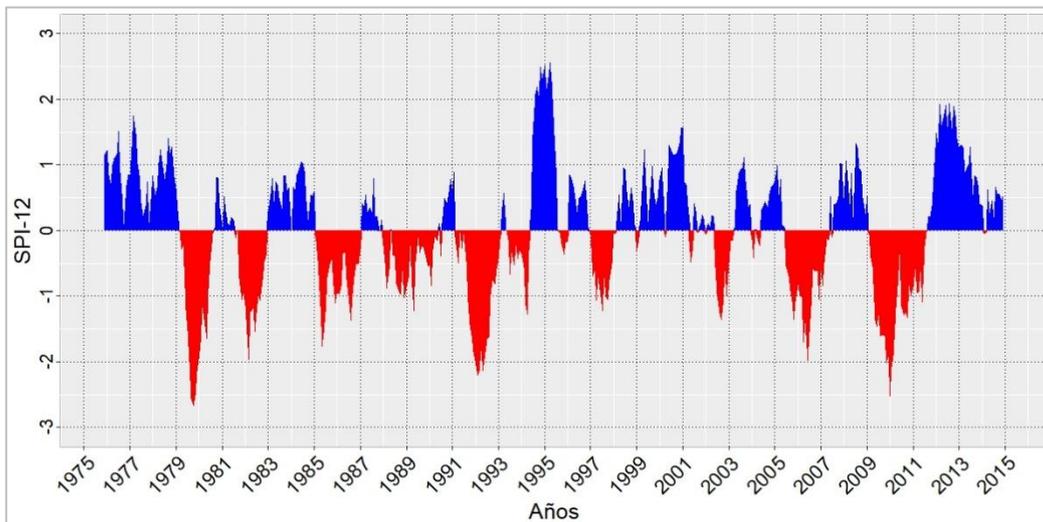


Figura 22. Índice estandarizado de precipitación a escala temporal de 12 meses de la estación Río Mazar Rivera, cuenca Paute, Ecuador.

La frecuencia, duración total y la probabilidad de ocurrencia de las sequías según su categoría se visualizan en la Tabla 19. La estación Río Mazar Rivera presentó el mayor número de sequías moderadas, con un total de 20 y una duración total de 44 meses; mientras que Gualaceo registró la mayor duración total, con 57 meses, en 11 eventos registrados. Río Mazar Rivera también registró el mayor número de sequías severas, con un total de 3, y una duración total de 36 meses; sin embargo El Labrado tuvo el mayor número de meses en sequía severa, con un total de 38, en las dos sequías severas que se identificaron. Ninguna de las tres estaciones presentó sequías extremas.

Tabla 19. Frecuencia y duración total de las sequías según el índice estandarizado de precipitación a escala temporal de 12 meses en la cuenca Paute.

Estación	Categoría de sequía	Frecuencia (N° de eventos)	Duración total (meses)	Probabilidad de ocurrencia anual (%)
El Labrado	Moderada	11	30	27.5%
	Severa	2	38	5%
	Extrema	0	0	0%
Gualaceo	Moderada	11	57	27.5%
	Severa	1	3	2.5%
	Extrema	0	0	0%
Río Mazar Rivera	Moderada	20	44	50%
	Severa	3	36	7.5%
	Extrema	0	0	0%

Las sequías de mayor magnitud se presentan en la Tabla 20. La estación El Labrado se presentó la sequía de mayor magnitud en la cuenca, con un valor de 41.20 y de intensidad severa, registrada entre setiembre de 2012 y setiembre de 2014. La segunda sequía en importancia de acuerdo a su magnitud se registró en Gualaceo, entre mayo 1985 y febrero de 1987, de categoría moderada, y de magnitud de 32.44. Las sequías de magnitud máxima de la estación Río Mazar Rivera se registraron en los años 1979-1980, 1991-1992 y 2009-2010, todas de categoría severa y de magnitudes entre los 20.61 a 22.61. El Labrado y Gualaceo, tienen en común que registran sequías importantes en cuanto a magnitud entre los años 1985 y 1987.

Tabla 20. Sequías de mayor magnitud según el índice estandarizado de precipitación a escala temporal de 12 meses en la cuenca Paute.

Estación	Duración (meses)	Magnitud	Intensidad	Categoría
El Labrado	Setiembre 2012-Setiembre 2014 (25)	41.20	-1.65	Severa
	Marzo 1985-Marzo 1986 (13)	20.02	-1.54	Severa
	Octubre 2010-Junio 2011 (9)	11.94	-1.33	Moderada
Gualaceo	Mayo 1985-Febrero 1987 (22)	32.44	-1.47	Moderada
	Mayo 1992-Febrero 1993 (10)	14.48	-1.45	Moderada
	Marzo 1988-Junio 1988 (4)	5.60	-1.40	Moderada
Río Mazar Rivera	Junio 1979-Mayo 1980 (12)	22.61	-1.88	Severa
	Setiembre 1991-Agosto 1992 (12)	21.50	-1.79	Severa
	Mayo 2009-Abril 2010 (12)	20.61	-1.72	Severa

2.5. Cuenca Jubones

2.8.1. Escala trimestral (Sequía agrícola)

La Figura 23 representa el SPI-3 de la estación Ushcurrumi. En la serie temporal se observa mucha variabilidad en el SPI, con períodos húmedos más intensos que los períodos secos. Las sequías se caracterizan por ser de intensidad moderada y de corta duración en su mayoría, con ausencia de períodos extremos. Se registraron un total de 31 sequías, de las cuales 24 son de categoría moderada y 7 severas.

Las sequías moderadas se presentaron en los siguientes períodos: julio 1977, diciembre 1977-febrero 1978, abril 1979, agosto 1979, diciembre 1979-febrero 1978, setiembre 1980, junio 1981, febrero-abril 1985, setiembre 1990, enero 1991, mayo-junio 1991, junio-noviembre 1996, octubre-noviembre 2000, octubre-noviembre 2001, enero 2002, setiembre 2002, abril 2003, junio 2003, marzo 2004, enero 2005, junio-setiembre 2005, agosto 2006, mayo 2009, junio 2013, y abril 2014. Las sequías severas se registraron en los períodos: diciembre 1989-febrero 1980, febrero 1982, mayo 1982, junio 1985, enero-abril 1990, junio 1995, octubre 2007, y setiembre-noviembre 2009.

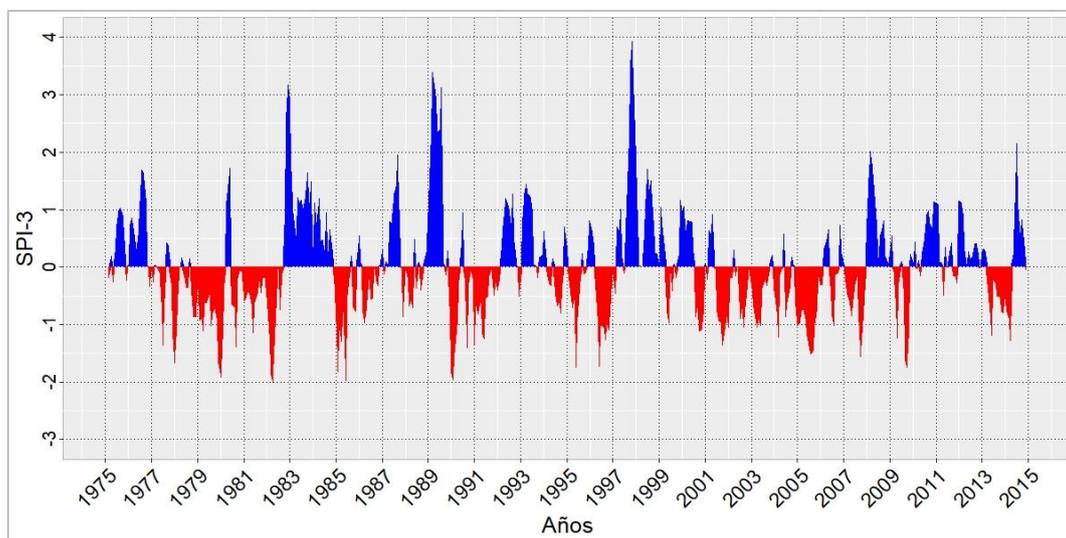


Figura 23. Índice estandarizado de precipitación a escala temporal de 3 meses de la estación Ushcurrumi, cuenca Jubones, Ecuador.

La frecuencia, duración total y la probabilidad de ocurrencia de las sequías en la estación Ushcurrumi están resumidas en la Tabla 21. Las sequías moderadas son las más frecuentes, y tienen una duración total de 39 meses. Las 7 sequías

moderadas registradas tienen una duración total de 17 meses. No se registraron sequías extremas.

Tabla 21. Frecuencia y duración total de las sequías según el índice estandarizado de precipitación a escala temporal de 3 meses en la cuenca Jubones.

Estación	Categoría de sequía	Frecuencia (N° de eventos)	Duración total (meses)	Probabilidad de ocurrencia anual (%)
Ushcurrumi	Moderada	24	39	60%
	Severa	7	17	17.5%
	Extrema	0	0	0%

Las principales sequías en cuanto a magnitud se resumen en la Tabla 22. En comparación con las demás cuencas analizadas, Jubones es la que presenta las sequías de menor magnitud, con un valor máximo de 7.19, perteneciente a una sequía de intensidad moderada que ocurrió entre junio y noviembre de 1996. Otras sequías importantes ocurrieron en los años 1982 y 1990, las cuales fueron de intensidad severa y con magnitudes de 6.42 y 6.34 respectivamente.

Tabla 22. Sequías de mayor magnitud según el índice estandarizado de precipitación a escala temporal de 3 meses en la cuenca Jubones.

Estación	Duración (meses)	Magnitud	Intensidad	Categoría
Ushcurrumi	Junio 1996-Noviembre 1996 (6)	7.19	-1.20	Moderada
	Febrero 1982-Mayo 1982 (4)	6.42	-1.61	Severa
	Enero 1990-Abril 1990 (4)	6.34	-1.59	Severa

2.8.2. Escala anual

La Figura 24 muestra la serie temporal del SPI-12 de la estación Ushcurrumi. Es evidente el predominio de sequías moderadas, y una presencia de períodos húmedos intensos. Se registraron 11 sequías moderadas y 1 severa. Las sequías moderadas ocurrieron en los períodos: marzo 1979-marzo 1980, abril 1985-diciembre 1985, marzo 1986, julio 1990-enero 1991, mayo 1991-diciembre 1991, febrero 1992, febrero 1997, abril-julio 2003, diciembre 2003-marzo 2004, abril 2005-febrero 2006, febrero-abril 2014. La única sequía severa se desarrolló entre febrero y octubre de 1982.

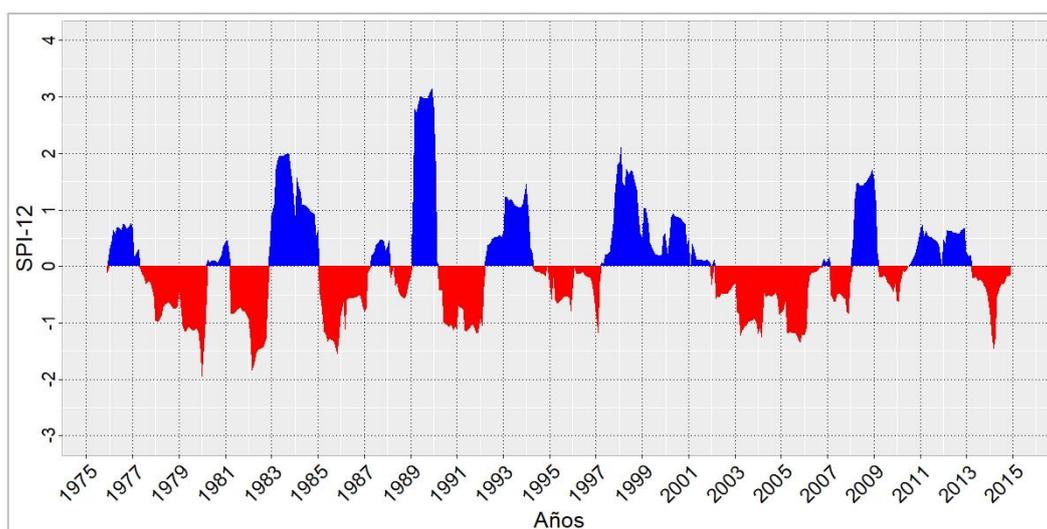


Figura 24. Índice estandarizado de precipitación a escala temporal de 12 meses de la estación Ushcurrumi, cuenca Jubones, Ecuador.

La Tabla 23 muestra la frecuencia, duración y probabilidad empírica de ocurrencia anual. Las 11 sequías moderadas tuvieron una duración total de 62 meses, y la única sequía severa tuvo una duración de 9 meses.

Tabla 23. Frecuencia y duración total de las sequías según el índice estandarizado de precipitación a escala temporal de 12 meses en la cuenca Jubones.

Estación	Categoría de sequía	Frecuencia (N° de eventos)	Duración total (meses)	Probabilidad de ocurrencia anual (%)
Ushcurrumi	Moderada	11	62	27.5%
	Severa	1	9	2.5%
	Extrema	0	0	0%

Las sequías de mayor magnitud se observan en la Tabla 24. El evento de mayor magnitud ocurrió entre marzo de 1979 y marzo de 1980, con un valor 15.99 y de intensidad moderada. Destacan también las sequías que ocurrieron en 1982 y entre los años 2005-2006, con magnitudes de 13.54 y 13.27 respectivamente.

Tabla 24. Sequías de mayor magnitud según el índice estandarizado de precipitación a escala temporal de 12 meses en la cuenca Jubones.

Estación	Duración (meses)	Magnitud	Intensidad	Categoría
Ushcurrumi	Marzo 1979-Marzo 1980 (13)	15.99	-1.23	Moderada
	Febrero 1982-October 1982 (9)	13.54	-1.50	Severa
	Abril 2005-Febrero 2006 (11)	13.27	-1.21	Moderada

2.6. Probabilidad de ocurrencia anual de las sequías.

La probabilidad de ocurrencia anual de las sequías es un parámetro útil para comprender las posibilidades de que ocurra una sequía de determinada categoría de intensidad en una región, basado en los años de datos pluviométricos disponibles. El mapa de la Figura 25 muestra el porcentaje de probabilidad de ocurrencia anual según el SPI-3 en las estaciones analizadas. La estación Ushcurrumi en la cuenca Lengupá, localizada en el pacífico ecuatoriano es la que presenta mayor probabilidad de ocurrencia anual de sequía moderada, con un 60%. Las estaciones La Guinea en la cuenca Tempisque-Bebedero y Pueblo Rico en la cuenca San Juan, tienen la menor probabilidad de ocurrencia de sequía moderada, con un 37.5%. En la cuenca Paute los porcentajes de probabilidad de sequía moderada oscilan entre el 47.5% (El Labrado y Gualaceo) al 50% (Río Mazar Rivera), mientras que en la cuenca Lengupá fluctúa entre el 40% (Piedra Campana) al 57.5% (Cedros).

En relación con las sequías severas, la estación Gualaceo en la cuenca Paute, presenta el porcentaje más alto de probabilidad de ocurrencia, con un 35%. Por otro lado, las estaciones de la cuenca Tempisque- Bebedero tienen la menor probabilidad de ocurrencia de sequía severa, con porcentajes entre el 5% (La Guinea), y el 15% (Gramita). En la cuenca Lengupá, la probabilidad de ocurrencia de sequías severas varía entre el 10% (Cedros), hasta el 32.5% (Piedra Campana). En las estaciones Ushcurrumi en la cuenca Jubones y Pueblo Rico en la cuenca San Juan, la probabilidad es de 17.5% y 20% respectivamente.

En lo correspondiente a las sequías extremas, las estaciones de la cuenca Tempisque-Bebedero en Costa Rica, son las que presentan mayor probabilidad de ocurrencia, con porcentajes entre el 10% (Corralillo) al 15% (La Guinea). La estación Ushcurrumi en la cuenca Jubones, no presenta probabilidad de ocurrencia sequía extrema. En la cuenca Paute, la probabilidad varía entre el 2.5% (Gualaceo) y el 10% (Río Mazar Rivera). Similar al Paute, la cuenca Lengupá tiene probabilidades entre el 2.5% (Piedra Campana) y el 10% (Cedros). Por su parte, la estación Pueblo Rico en la cuenca San Juan, tiene una probabilidad de ocurrencia del 2.5% anual.

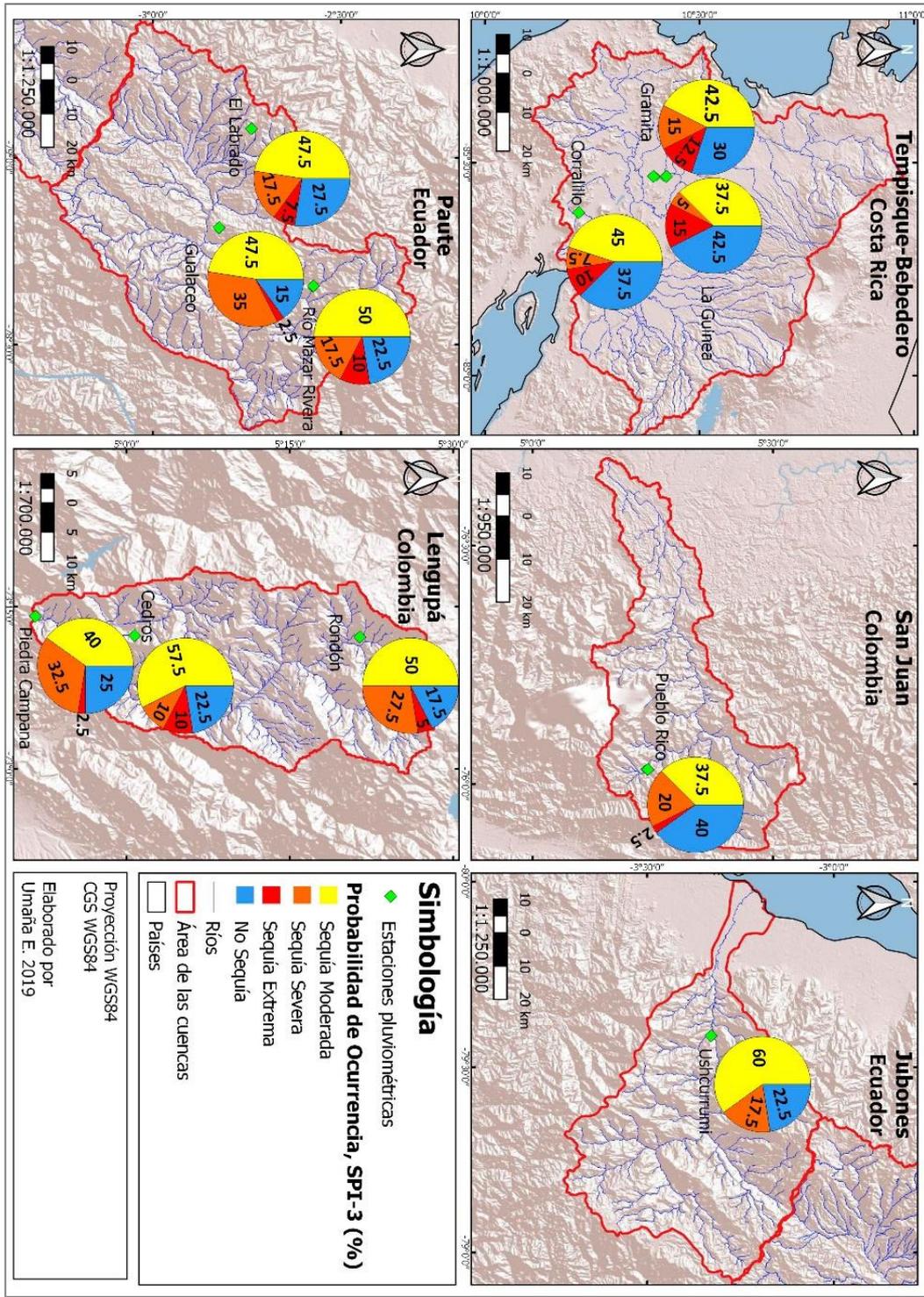


Figura 25. Probabilidad de ocurrencia anual de sequía según el índice estandarizado de precipitación a escala temporal de 3 meses.

La probabilidad de ocurrencia anual de sequía de acuerdo al SPI-12 es significativamente menor en comparación a la probabilidad de ocurrencia según el SPI-3. La Figura 26 muestra los porcentajes de probabilidad de ocurrencia anual de sequías según el SPI-12. Río Mazar Rivera, en la cuenca Paute, es la estación

que presenta mayor probabilidad de ocurrencia de sequías moderadas, con un 50%. La cuenca Tempisque-Bebedero tiene en promedio, las probabilidades de ocurrencia de sequías moderadas más bajas, con porcentajes entre los 5% (Corralillo) a 15% (La Guinea). En San Juan, la probabilidad es de 17.5% (Pueblo Rico), y en Jubones de 27.5% (Ushcurrumi). En la cuenca Lengupá la probabilidad oscila entre el 22.5% (Rondón) al 30% (Cedros), mientras que en la cuenca Paute el porcentaje oscilan entre el 27.5% (El Labrado, Gualaceo) al 50% (Río Mazar Rivera).

En relación con las sequías severas, la probabilidad de ocurrencia anual tiende a ser menor en la cuenca Tempisque-Bebedero, con porcentajes de 2.5% en las estaciones La Guinea y Gramita, y con una probabilidad de 0% en la estación Corralillo. Asimismo en las estaciones Gualaceo (cuenca Paute) y Ushcurrumi (cuenca Jubones), la probabilidad también es de 2.5%. En la cuenca Lengupá la probabilidad oscila entre 5% (Cedros) y el 20% (Rondón). En la estación Pueblo Rico, en la cuenca San Juan, la probabilidad de ocurrencia de sequías severas es del 10%.

En cuanto a las sequías extremas, las cuencas San Juan, Jubones y Paute no presentaron sequías extremas, por lo tanto las probabilidad es 0%. La cuenca Lengupá por su parte, tiene una probabilidad de sequía extrema de un 2.5%, registradas en las estaciones Rondón y Cedros, mientras que la estación Piedra Campana no registró sequías extremas. La cuenca Tempisque-Bebedero presenta la mayor probabilidad de sequías extrema con porcentajes entre los 2.5% (Gramita y La Guinea) al 5% (Corralillo).

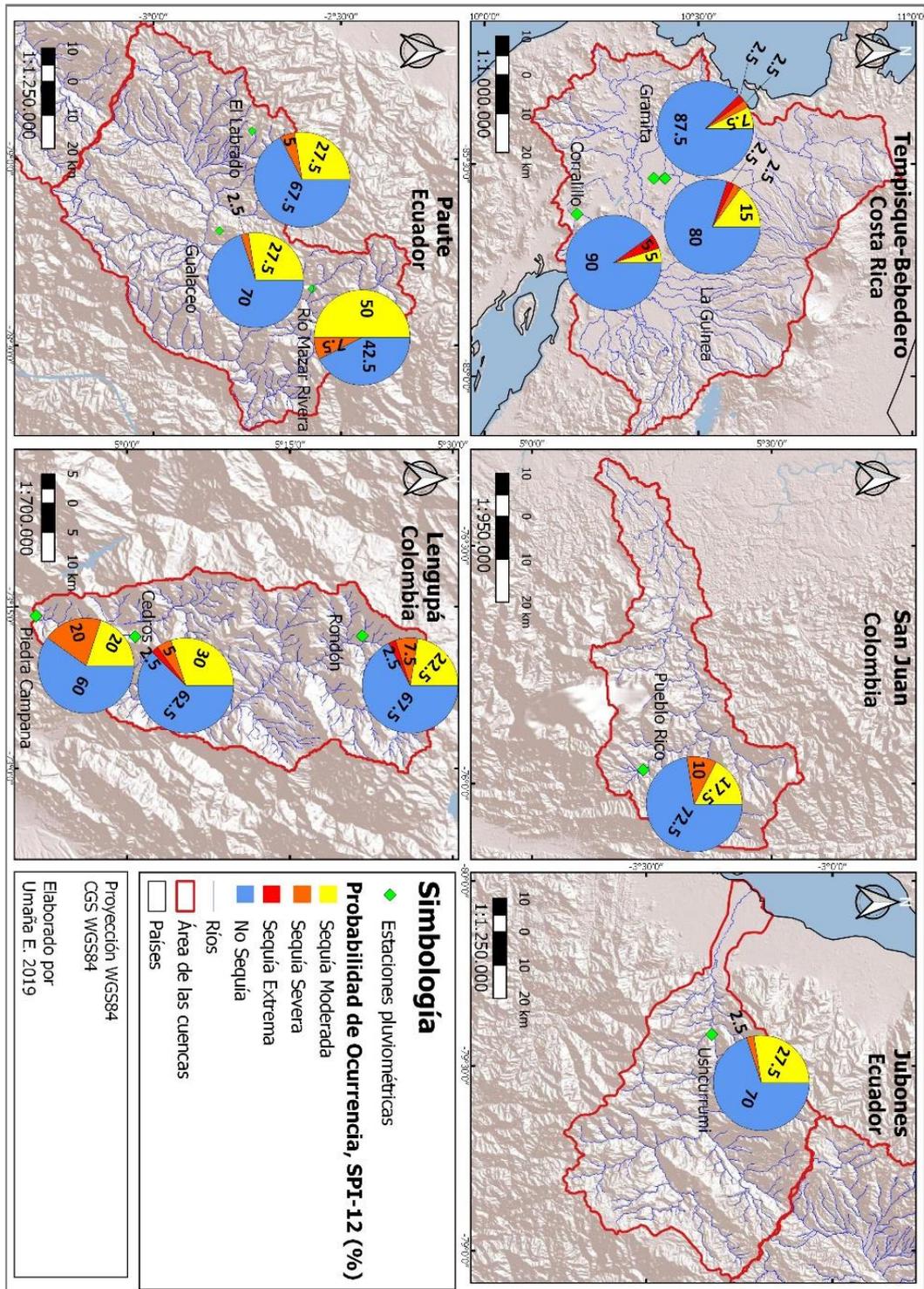


Figura 26. Probabilidad de ocurrencia anual de sequía según el índice estandarizado de precipitación a escala temporal de 12 meses.

En síntesis, la probabilidad de ocurrencia de sequías moderadas es mayor en las cuencas Paute y Jubones; las sequías severas presentan mayor probabilidad en las cuencas Lengupá, Paute y San Juan, mientras que las sequías extremas muestran mayor probabilidad en la cuenca Tempisque-Bebedero.

Capítulo III. Influencia de la teleconexión en las sequías.

Para medir la relación de las sequías con los índices de teleconexión se utilizaron el modelo de regresión lineal múltiple (RLM) y el modelo de regresión Random Foreste (RF), en los cuales se establece al SPI de cada estación como variable dependiente y los índices de teleconexión como variables independientes. Se consideraron los coeficientes de determinación ajustado (R^2) en los dos modelos para medir dicha relación. Además se calculó la importancia de cada variable independiente, con el fin de determinar cuáles índices de teleconexión están más relacionados con los patrones de precipitación de cada cuenca.

En términos generales, el SPI-12 muestra una relación más fuerte con los índices de teleconexión porque sus valores presentan una menor variabilidad debido a la acumulación del promedio de 12 meses, lo cual se asemeja al comportamiento interanual de algunos índices de teleconexión. Por otro lado, el SPI-3 tiende a presentar mayor variabilidad, debido a que acumula el promedio de 3 meses, lo cual genera coeficientes R^2 menores en comparación al SPI-12.

3.1. Escala trimestral (Sequía agrícola)

La Tabla 25 compara los resultados de los coeficientes de determinación R^2 de los dos métodos de regresión y muestra el índice de teleconexión de mayor importancia en cada estación de acuerdo al SPI-3. En la mayoría de los casos, el coeficiente R^2 de la regresión RF es superior al de la RLM. En general, las estaciones ubicadas en las cuencas de la vertiente del Pacífico presentaron un R^2 superior al de las cuencas andinas pertenecientes a la vertiente del Atlántico. Ushcurrumi, en la cuenca Jubones (Ecuador, Pacífico), es la estación que registró el mayor coeficiente R^2 de todas las estaciones estudiadas, tanto en el RLM como en la regresión RF.

Las estaciones de la cuenca Tempisque-Bebedero presentaron coeficientes R^2 que oscilan entre los 0.16 a 0.19 de acuerdo al RLM y de 0.31 a 0.36 según la regresión RF. Después de las cuencas Jubones y San Juan, Tempisque-Bebedero es la cuenca que registró el mayor R^2 promedio de acuerdo a la RLM; y el segundo más alto según la regresión RF, después de la cuenca Jubones. En las tres estaciones el índice AMO fue el de mayor importancia de acuerdo a la regresión

RF; mientras que la RLM indicó que los índices más importantes son el Niño 3.4, el MEI y la AMO,

Lengupá, ubicada en los andes colombianos, fue la cuenca que presentó el menor promedio de coeficiente R^2 . Sin embargo, la estación Zetaquirá destacó por poseer el coeficiente más alto dentro de la cuenca, tanto en la RLM como en el RF (0.13 y 0.32 respectivamente). De acuerdo a la RLM, todas las estaciones excepto Zetaquirá registraron coeficientes menores a 0.1. No obstante, según la regresión RF, las estaciones Zetaquirá, Campo Buenavista, Páez y Cedros presentaron coeficientes entre los 0.14 a 0.32.

Respecto a la importancia de los índices de teleconexión en la cuenca Lengupá, de acuerdo al RF, en las estaciones Rondón y Zetaquirá, ubicadas en la parte alta de la cuenca, la AMO fue el índice de mayor importancia. En las estaciones de la cuenca media, el Niño 4 fue el índice más importante en las estaciones Campo Buenavista y Cedros; mientras que en la estación Páez el TNI fue el principal índice. En la parte baja de la cuenca, representada por la estación Piedra Campana, se registró el TNI como el índice de mayor importancia. El Niño 3.4 y la AMO fueron los índices de mayor importancia en las estaciones Rondón y Zetaquirá respectivamente, de acuerdo a la RLM, mientras que la AMO lo fue para las estaciones Campo Buenavista y Páez. Las estaciones Cedros y Piedra Campana, registraron al Niño 4 y Niño 3 correspondientemente como los índices más importantes en la RLM.

En los andes ecuatorianos, las estaciones con el mayor coeficiente R^2 de la cuenca Paute fueron Gualaceo y Paute, ubicadas en la cuenca media. Gualaceo tuvo el mayor coeficiente de acuerdo al RLM (0.20), y Paute fue la estación con el R^2 más alto según la regresión RF (0.25). Las estaciones Río Mazar Rivera y Sayausi son las que presenta el menor coeficiente en la RLM y el RF respectivamente. En relación a la importancia de los índices de teleconexión, de acuerdo con la RLM, el Niño 4 fue el índice de mayor jerarquía de importancia en todas las estaciones. En la regresión RF, los índices de mayor importancia varían, ya que en las estaciones El Labrado y Río Mazar Rivera (cuenca alta y baja), el TNI es el índice de mayor importancia; en la parte media, con las estaciones Sayausi y Ricaurte Cuenca, el Niño 4 fue el más importante, mientras que en las estaciones Gualaceo y Paute, los índices de mayor jerarquía de importancia fueron el MEI y la AMO correspondientemente.

En la estación Pueblo Rico, ubicada en la cuenca San Juan, se registraron coeficientes R^2 de 0.27 y 0.29 según la RLM y la regresión RF respectivamente. El índice de mayor importancia fue el Niño 3.4 en los dos métodos de regresión.

En el caso de la cuenca Jubones, la estación Ushcurrumi registró coeficientes R^2 de 0.40 y 0.46 de acuerdo a la RLM y la regresión RF. El índice más importante fue el TNI en ambos métodos de regresión. .

Tabla 25. Coeficiente de determinación R^2 de la relación entre el SPI a escala temporal de 3 meses y los índices de teleconexión según la regresión lineal múltiple y la regresión Random Forest.

País	Cuenca	Estaciones	R^2 ajustado RLM	Índice de mayor importancia (RLM)	Nº de variables (RLM)	R^2 Regresión RF	Índice de mayor importancia (RF)
Costa Rica (Pacífico)	Tempisque -Bebedero	Gramita	0.18	El Niño 3.4	4	0.36	AMO
		La Guinea	0.19	AMO	4	0.36	AMO
		Corralillo	0.16	MEI	4	0.31	AMO
Colombia (Pacífico)	San Juan	Pueblo Rico	0.27	El Niño 3.4	4	0.29	El Niño 3.4
		Rondón	0.06	El Niño 3.4	4	-0.19	AMO
Colombia (Orinoco, Atlántico)	Lengupá	Zetaquirá	0.13	AMO	5	0.32	AMO
		Campo Buenavista	0.04	AMO	5	0.14	El Niño 4
		Páez	0.07	AMO	5	0.28	TNI
		Cedros	0.07	El Niño 4	5	0.23	El Niño 4
		Piedra Campana	0.01	El Niño 3	4	-0.06	TNI
Ecuador (Amazonas, Atlántico)	Paute	El Labrado	0.12	El Niño 4	3	0.20	TNI
		Sayausi	0.09	El Niño 4	4	0.15	El Niño 4
		Ricaurte Cuenca	0.10	El Niño 4	3	0.17	El Niño 4
		Gualaceo	0.20	El Niño 4	4	0.24	MEI
		Paute	0.15	El Niño 4	6	0.25	AMO
Río Mazar Rivera	0.02	El Niño 4	5	0.19	TNI		
Ecuador (Pacífico)	Jubones	Ushcurrumi	0.40	TNI	8	0.46	TNI

El mapa de la Figura 27 muestra a las estaciones con el R^2 más alto en cada cuenca de acuerdo a la regresión RF y los gráficos de pastel representan la importancia de los índices de teleconexión en el modelo de regresión. Jubones, representado con el punto de color rojo, fue la cuenca que registró el mayor R^2 de todas. Las estaciones con mayor R^2 de las cuencas Tempisque-Bebedero y Lengupá, están representadas por los puntos de color amarillo, los cuales indican coeficientes entre 0.30 y 0.40. Las cuenca San Juan y Paute registraron el menor rango de coeficiente R^2 , representados por puntos de color verde.

En la cuenca Tempisque-Bebedero, la estación La Guinea indica que la AMO fue el índice de mayor importancia, con un 19.8%, con una diferencia considerable al segundo lugar que es el MEI que obtuvo un 11.3%. En Colombia, la estación Pueblo Rico en la cuenca San Juan, registró el Niño 4 como el más importante, con un 15.6%, seguido muy de cerca por el MEI que tuvo un 14.9%. En Lengupá, la estación Zetaquirá mostró que la AMO (20.8%) fue el índice de mayor importancia, mientras que la Oscilación Decenal del Pacífico (PDO) obtuvo un 11.4%. En Ecuador, la estación Paute en la cuenca del mismo nombre, registró a la AMO y el MEI como los índices de mayor importancia, con porcentajes de 14.6% y 14.1% respectivamente. En la estación Ushcurrumi de la cuenca Jubones, el TNI fue el principal índice de teleconexión, con un 26.1%, mientras que El Niño 1+2, segundo en importancia, registró un 15.4% de importancia.

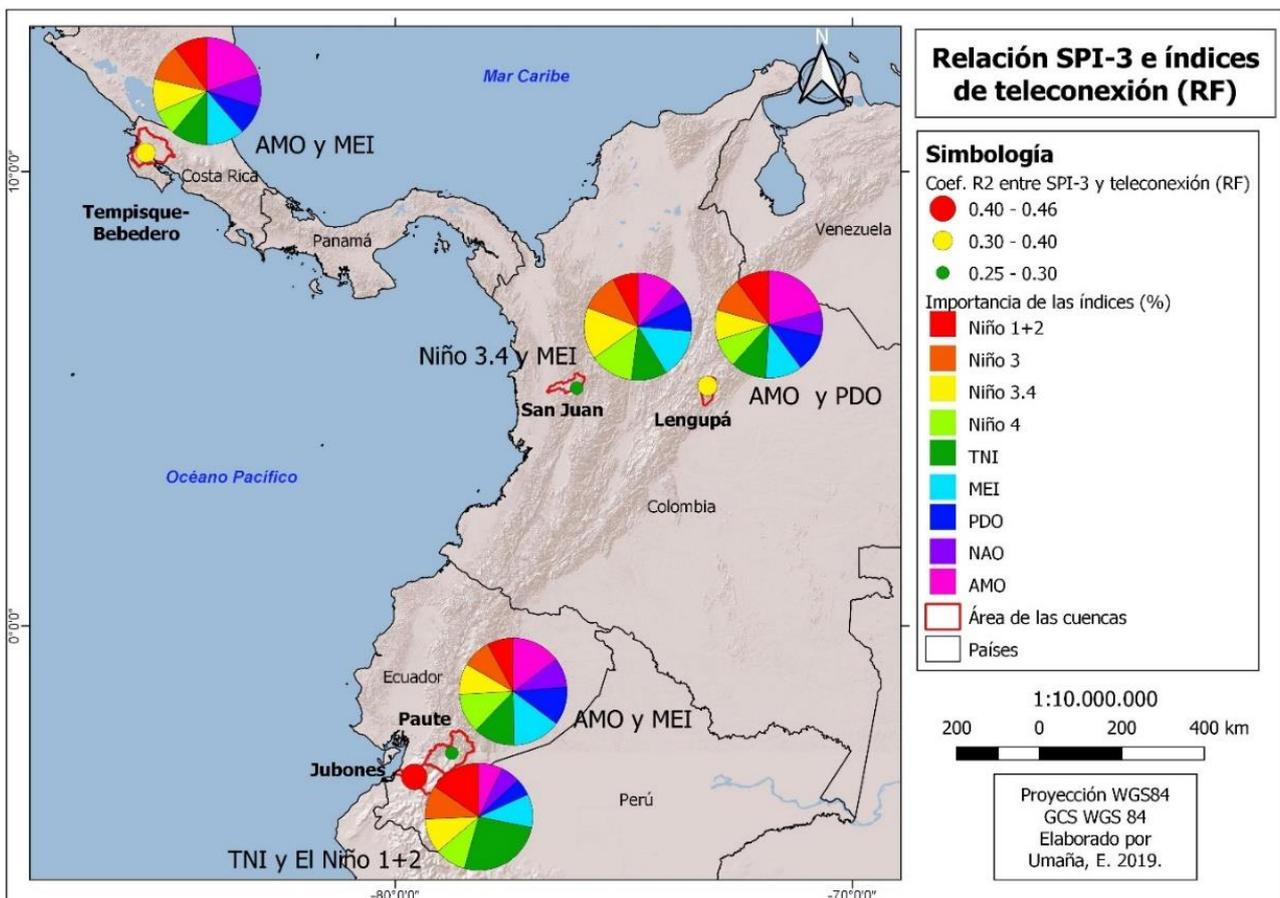


Figura 27. Mapa de las estaciones con el mayor coeficiente R^2 de la relación entre el SPI-3 y los índices de teleconexión de acuerdo con el modelo de regresión Random Forest.

El mapa de la Figura 28, muestra las estaciones con el mayor coeficiente R^2 de cada cuenca según la RLM, así como los porcentajes de importancia relativa de los índices que se utilizaron en los modelos de regresión. La cuenca Jubones, al igual que en la regresión RF, es la que presenta mayor relación con la teleconexión, y está representado con el punto de color rojo. Después de Jubones, San Juan es la cuenca con mayor coeficiente R^2 , representado con el punto de color amarillo. Las cuencas Tempisque-Bebedero, Paute y Lengupá, son las que presentan el menor rango de coeficiente R^2 , por lo cual están representados con el color verde.

Respecto a la importancia de los índices, la AMO y el Niño 3.4 fueron los más importantes de la regresión en la estación La Guinea de la cuenca Tempisque-Bebedero, con porcentajes de 43.8% y 39% respectivamente. En la estación Pueblo Rico de la cuenca San Juan, los índices de mayor importancia fueron el Niño 3.4 (44.5%) y el Niño 4 (39.7%). En Lengupá, el principal índice en importancia es la AMO, con un 70%. En la cuenca del Paute, la estación Gualaceo registró El Niño 4 y la PDO como los índices de mayor importancia, con un 44.3% y 30.2% correspondientemente. Por su parte, la cuenca Jubones, mostró que el TNI es el índice más importante, con un 38.9%, mientras que el Niño 1+2 tuvo un 21.8% de importancia.

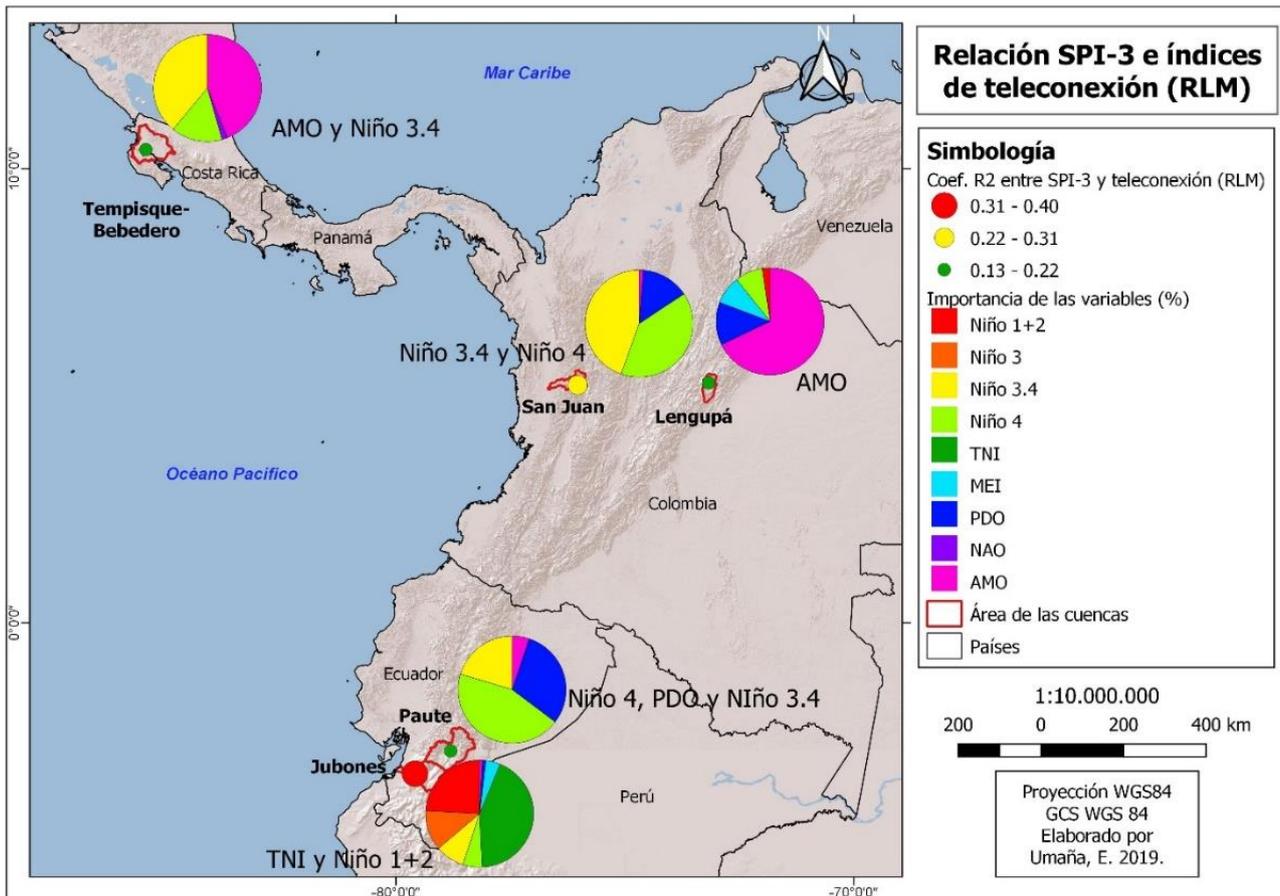


Figura 28. Mapa de las estaciones con el mayor coeficiente R^2 de la relación entre el SPI-3 y los índices de teleconexión de acuerdo con el modelo de regresión lineal múltiple.

3.2. Escala anual (Sequía hidrológica)

La Tabla 26 muestra los coeficientes R^2 de la RLM y RF que relaciona el SPI-12 de las estaciones con los índices de teleconexión, así como los índices de mayor importancia en ambos métodos de regresión. La estación Gualaceo en la cuenca del Paute, registró el coeficiente R^2 más alto en la RLM, mientras que la estación Ushcurrumi en la cuenca Jubones fue la que obtuvo el mayor coeficiente en la regresión RF.

En la cuenca Tempisque-Bebedero, la estación La Guinea registró el mayor R^2 en la RLM (0.23), aunque con poca diferencia respecto a las estaciones Corralillo y Gramita que obtuvieron 0.19 y 0.18 respectivamente. De acuerdo con el RF, los coeficientes de estas estaciones oscilan entre los 0.42 y 0.43, siendo Corralillo la estación con el mayor coeficiente. En cuanto a la importancia de las variables, todas las estaciones registraron a la AMO como el índice de

teleconexión más importante en la regresión RF, mientras que en la RLM los índices principales fueron El Niño 3.4 y el MEI.

Al igual que en el SPI trimestral, la cuenca Lengupá es la que presenta, en promedio, el coeficiente R^2 más bajo de las cuencas en estudio, tanto en la RLM como en el RF. La estación Zetaquirá obtuvo el coeficiente más alto en la cuenca Lengupá en la RLM (0.27), y la estación Cedros fue la más destacada en la regresión RF (0.40). En la RLM, en términos generales, los coeficientes R^2 fueron muy bajos, con valores inferiores a 0.11, a excepción de la estación Zetaquirá; mientras que la regresión RF mostró coeficientes entre 0.20 a 0.40. Piedra Campana, ubicada en la parte baja de la cuenca, registró el menor R^2 en ambas regresiones. El índice de mayor importancia más común fue la AMO en los dos métodos de regresión, no obstante, el Niño 3.4 y MEI fueron los más importantes en las estaciones Rondón y Cedros respectivamente, según la RLM. En la regresión RF, las estaciones Rondón y Piedra Campana registraron a la PDO y el TNI como los índices más importantes; mientras que en las demás estaciones, la AMO fue el más dominante.

En la cuenca Paute, las estaciones Gualaceo y Paute (0.36 y 0.26, respectivamente), ubicadas en la parte media, son las que registraron los mayores coeficientes R^2 de acuerdo al método de RLM. No obstante, en la regresión RF, la estación con mayor R^2 fue El Labrado (0.41), ubicada en la cuenca alta, seguido de Gualaceo (0.40). Río Mazar Rivera, la estación que representa la parte baja de la cuenca, es la que registra el menor coeficiente en los dos métodos. Respecto a la importancia de los índices de teleconexión, ambos métodos coinciden que el TNI fue el índice de mayor importancia en las estaciones El Labrado, Sayausi, y Paute; mientras que la PDO lo fue en las estaciones Gualaceo y Río Mazar Rivera, y el Niño 3.4 en la estación Ricaurte Cuenca.

Por su parte, la estación Pueblo Rico en la cuenca San Juan, obtuvo un R^2 de 0.31 de acuerdo a la RLM, siendo éste el más importante después de las estaciones Ushcurrumi (0.32) en la cuenca Jubones y Gualaceo (0.36) en la cuenca del Paute. Según el método RF, las estaciones Pueblo Rico (0.46) y Ushcurrumi (0.56) fueron las que registraron los mayores coeficientes.

Para la estación Pueblo Rico, en la cuenca San Juan, el índice de mayor importancia según la RLM es el Niño 4, mientras que la PDO fue el más

importante de acuerdo a la regresión RF. En el caso de la cuenca Jubones, la estación Ushcurrumi registró el TNI como el principal índice en ambos métodos.

Tabla 26. Coeficiente de determinación R² de la relación entre el SPI a escala temporal de 12 meses y los índices de teleconexión según la regresión lineal múltiple y la regresión Random Forest.

País (Vertiente)	Cuenca	Estaciones	R² ajustado RLM	Índice de mayor importancia (RLM)	Nº de variables (RLM)	R² Regresión RF	Índice de mayor importancia (RF)
Costa Rica (Pacífico)	Tempisque-Bebedero	Gramita	0.18	El Niño 3.4	5	0.42	AMO
		La Guinea	0.23	El Niño 3.4	6	0.42	AMO
		Corralillo	0.19	MEI	8	0.43	AMO
Colombia (Pacífico)	San Juan	Pueblo Rico	0.31	El Niño 4	5	0.46	PDO
Colombia (Orinoco, Atlántico)	Lengupá	Rondón	0.09	El Niño 3.4	5	0.22	PDO
		Zetaquirá	0.27	AMO	3	0.36	AMO
		Campo Buenavista	0.06	AMO	4	0.37	AMO
		Páez	0.11	AMO	6	0.22	AMO
		Cedros	0.07	MEI	2	0.40	AMO
		Piedra Campana	0.04	AMO	2	0.20	TNI
Ecuador (Amazonas, Atlántico)	Paute	El Labrado	0.20	TNI	4	0.41	TNI
		Sayausi	0.23	TNI	6	0.34	TNI
		Ricaurte Cuenca	0.20	El Niño 4	6	0.38	El Niño 4
		Gualaceo	0.36	PDO	6	0.40	PDO
		Paute	0.26	TNI	5	0.34	TNI
		Río Mazar Rivera	0.05	PDO	3	0.27	PDO
Ecuador (Pacífico)	Jubones	Ushcurrumi	0.32	TNI	6	0.56	TNI

El mapa de la Figura 29 representa las estaciones con el mayor R² de cada cuenca y la importancia de los índices de teleconexión de acuerdo a la regresión RF. El mapa muestra que la relación del SPI-12 con los índices de teleconexión tiende a ser más fuerte en las cuencas de la vertiente del Pacífico, en especial las cuencas Jubones y San Juan, representadas con puntos de color rojo y amarillo respectivamente. Las estaciones Corralillo (Tempisque-Bebedero), El Labrado (Paute) y Cedros (Lengupá) están representadas con color verde, los cuales se encuentran en el menor rango.

Respecto a la importancia de los índices de teleconexión, la estación Corralillo de la cuenca Tempisque-Bebedero, registró a la AMO (15%) como el índice de mayor importancia, mientras que los índices TNI (13.5%) y MEI (13.1%) le siguen de cerca en orden de importancia. La estación Pueblo Rico, en

la cuenca San Juan, indicó a la PDO (17%) como la variable más importante en el modelo de regresión, con una ligera diferencia respecto al MEI (16.6%) y el Niño 4 (15.4%). En la cuenca Lengupá, la AMO fue el principal índice de teleconexión con un 18.4%, mientras que el MEI fue el segundo en importancia con un 13.4%. La estación El Labrado, en la cuenca Paute, registró al TNI como la variable más importante con un 21%, con una diferencia significativa respecto al Niño 4 (13.3%), segundo en importancia. En Jubones, la estación Ushcurrumi registró también el TNI (23.5%) como el principal índice, y el Niño 4 (14.3%) como el segundo en importancia.

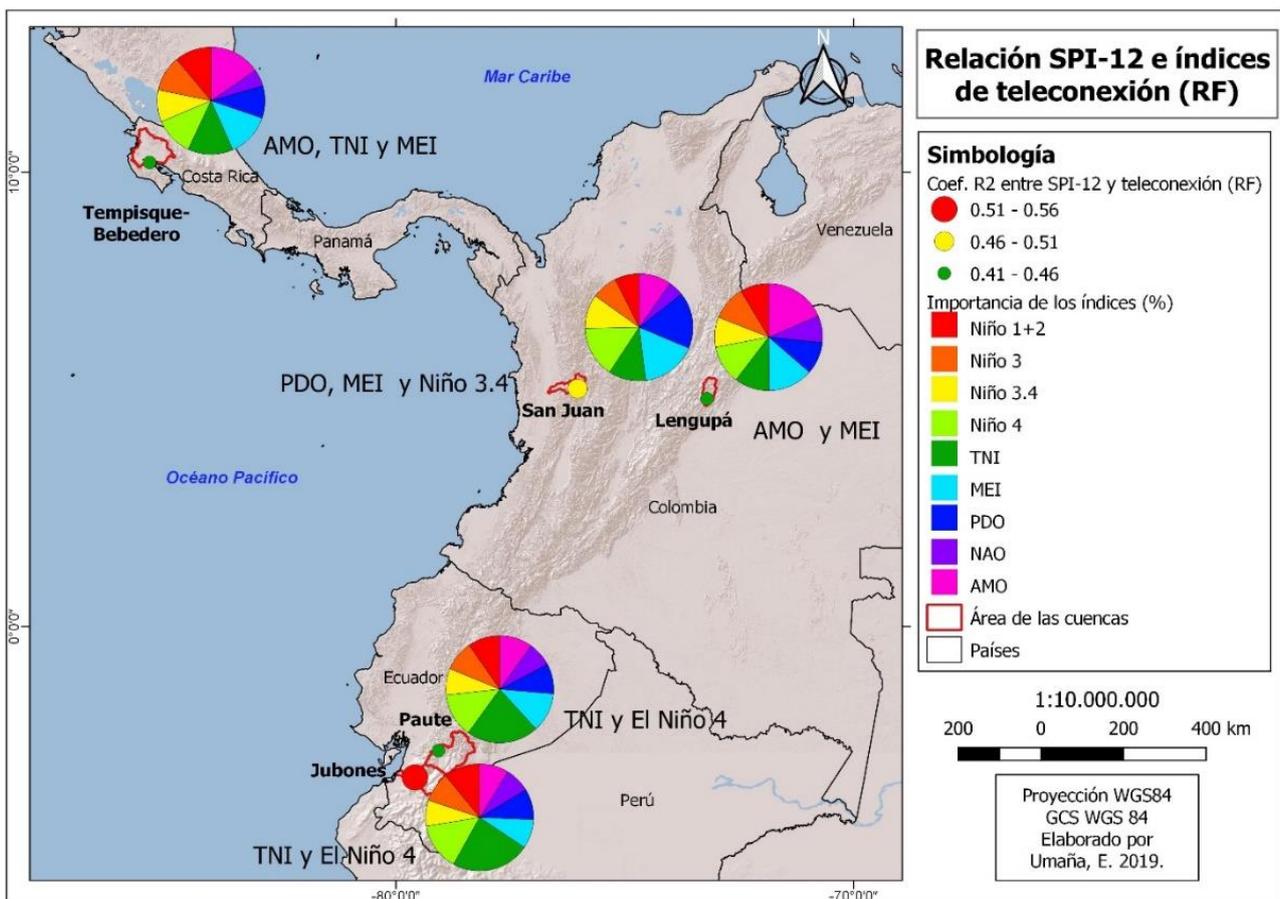


Figura 29. Mapa de las estaciones con el mayor coeficiente R^2 de la relación entre el SPI-12 y los índices de teleconexión de acuerdo con el modelo de regresión Random Forest.

El mapa de la Figura 30 categoriza a las estaciones con mayor coeficiente R^2 , así como la importancia relativa de los índices en la RLM. Las cuencas ecuatorianas obtuvieron los coeficientes más elevados, específicamente en las estaciones Ushcurrumi y Gualaceo, ambas representadas con color rojo. Pueblo Rico en la cuenca San Juan, es la tercera estación en importancia de acuerdo al R^2 ,

por lo cual está representado con el punto de color amarillo. La Guinea, en la cuenca Tempisque-Bebedero, y Zetaquirá, en la cuenca Lengupá, son las estaciones que se encuentran en el menor rango del coeficiente R^2 , representados por los puntos de color verde.

Respecto a la importancia relativa de los índices de teleconexión en la RLM, la cuenca Tempisque-Bebedero registró a los índices Niño 3.4 (22.3%), AMO (21.8%) y PDO (18.1%) como los más importantes en el modelo de regresión. En la cuenca San Juan, los principales índices registrados fueron el Niño 4 (32.2%), la PDO (27.1%) y el MEI (26.1%). En Lengupá, la AMO tuvo una importancia del 70%, con una diferencia significativa los demás índices. En la cuenca Paute, la PDO tuvo el mayor porcentaje de importancia con un 37.5%, con una diferencia importante respecto a los índices TNI (17.6%) y Niño 4 (17.2%). En la cuenca Jubones, el TNI fue el principal índice en importancia con un 55.1%, mientras que el segundo en importancia fue el Niño 4 (21%).

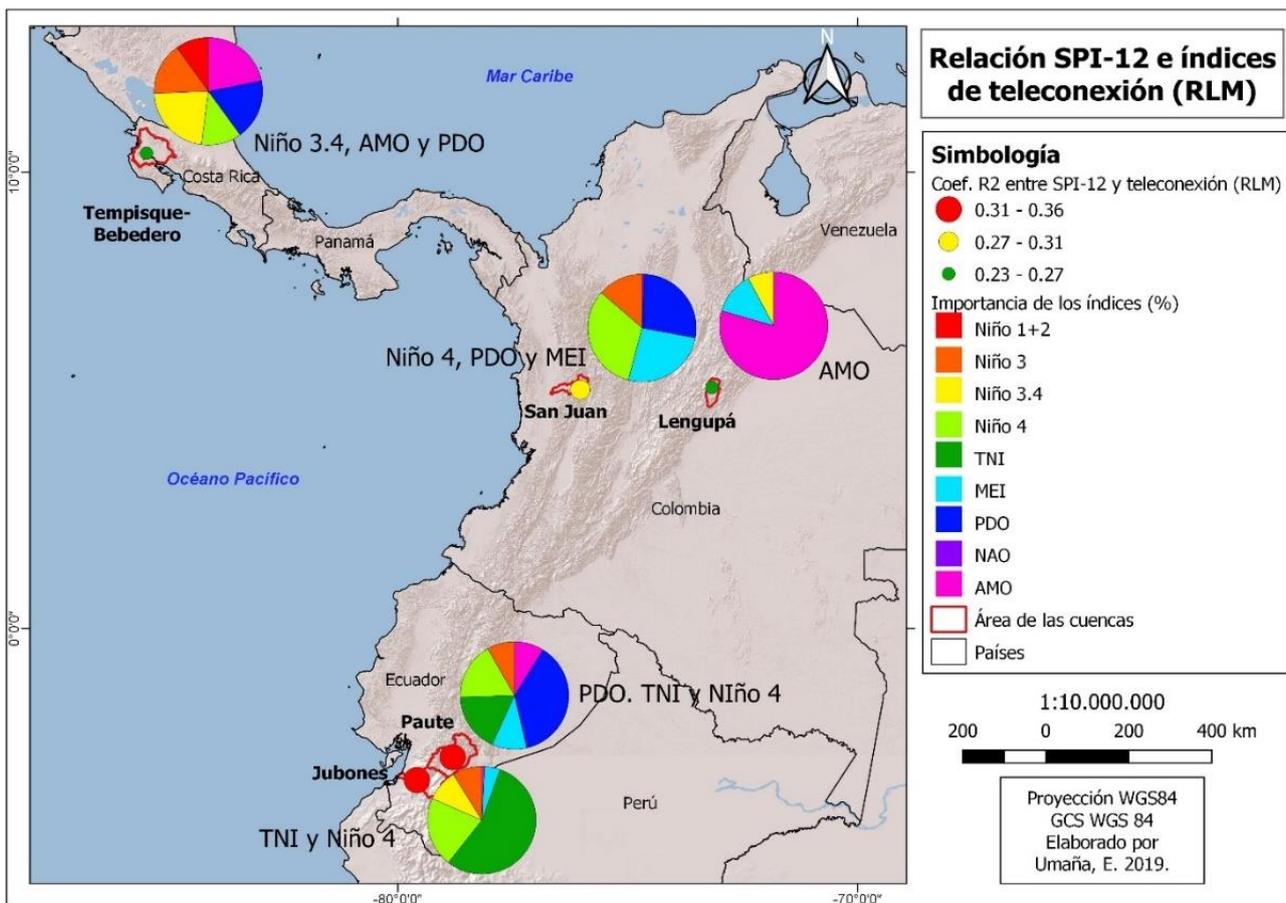


Figura 30. Mapa de las estaciones con el mayor coeficiente R^2 de la relación entre el SPI-12 y los índices de teleconexión de acuerdo con el modelo de regresión lineal múltiple.

3.4. Variabilidad espacial de la relación SPI y la teleconexión en la cuenca Paute

En la cuenca del río Paute, tal y como se evidenció en los coeficientes de determinación, la relación del SPI con los índices de teleconexión varía de acuerdo a la altitud y ubicación en la cuenca. Los mapas de las figuras 31 y 32 muestran la distribución de las estaciones en la cuenca y la clasificación de éstas según el R^2 de la RLM, tomando como referencia el SPI trimestral y anual. En ambas escalas temporales, se observa el mismo patrón espacial del coeficiente de determinación ajustado, en el cual las estaciones ubicadas en la cuenca media (Paute y Gualaceo) presentaron un R^2 superior a las demás estaciones, mientras que la estación ubicada en la parte baja de la cuenca (Río Mazar Rivera) mostró el menor coeficiente R^2 .

En los modelos de RLM, tanto a escala trimestral como anual, se muestra una relación más fuerte con los índices Niño 4, TNI y PDO. Lo anterior se refleja en la importancia relativa de los índices, ya que en el caso del SPI-3, en todas las estaciones el índice de mayor importancia fue el Niño 4; y en el caso del SPI-12, el TNI, el Niño 4 y la PDO fueron los principales índices.

La variabilidad espacial de la relación entre el SPI y los índices de teleconexión puede ser explicado por la compleja orografía de la cuenca y la existencia de diferentes regímenes de precipitación. En la cuenca Paute, existen dos regímenes de precipitación principales, que su vez se subdividen en dos: unimodal (1 y 2) y bimodal (1 y 2) (Célleri et al., 2007). La estación Río Mazar Rivera pertenece al régimen unimodal 2, caracterizada por un pico de precipitación entre junio y julio, y un promedio entre 1100 a 1600 mm anuales (Célleri et al., 2007). En la depresión central, que representa la parte media de la cuenca, con altitudes menores a los 3000 msnm se ubican las estaciones Sayausi, Ricuarte Cuenca, Gualaceo y Paute, las cuales pertenecen al régimen bimodal 1, caracterizado por tener dos máximas de lluvias en abril y octubre, con precipitaciones entre 660 a 1100 mm anuales (Célleri et al., 2007). Finalmente la estación El Labrado presenta un régimen bimodal 2, cuya extensión se encuentra por encima de los 3000 msnm, con precipitaciones entre los 1000 a 1800 mm anuales (Célleri et al., 2007).

Río Mazar Rivera, al ser la estación más oriental y de menor altitud, recibe la influencia más directa de los vientos húmedos que provienen de la cuenca

amazónica (Céleri et al., 2007). La predominancia de los vientos del este inhibe la influencia del Pacífico, y por ende la relación con los índices de teleconexión es menor en este sector de la cuenca.

La parte central de la cuenca, donde se ubica el valle interandino, el clima es dominado por las masas de aire procedentes del Pacífico al oeste y por las que provienen del Atlántico al este (Urgilés, 2015; Vuille et al., 2000). En esta región la precipitación es menor debido a que las masas de aire pierden gran parte de la humedad en la Cordillera Occidental y Oriental (Vuille et al., 2000). La combinación de ambas masas de aire es una de las posibles razones por las cuales la relación con los índices de teleconexión es relativamente mayor que en los demás sectores de la cuenca. La complejidad de la orografía es un factor fundamental para comprender las diferencias en la relación del SPI y la teleconexión en las estaciones ubicadas en la cuenca media. Esto explica por qué las estaciones Gualaceo y Paute presentan coeficientes R^2 que superan a los de las estaciones Sayausi y Ricaurte Cuenca, a pesar de que presentan un régimen de lluvias similar y que se encuentran a distancias relativamente cortas.

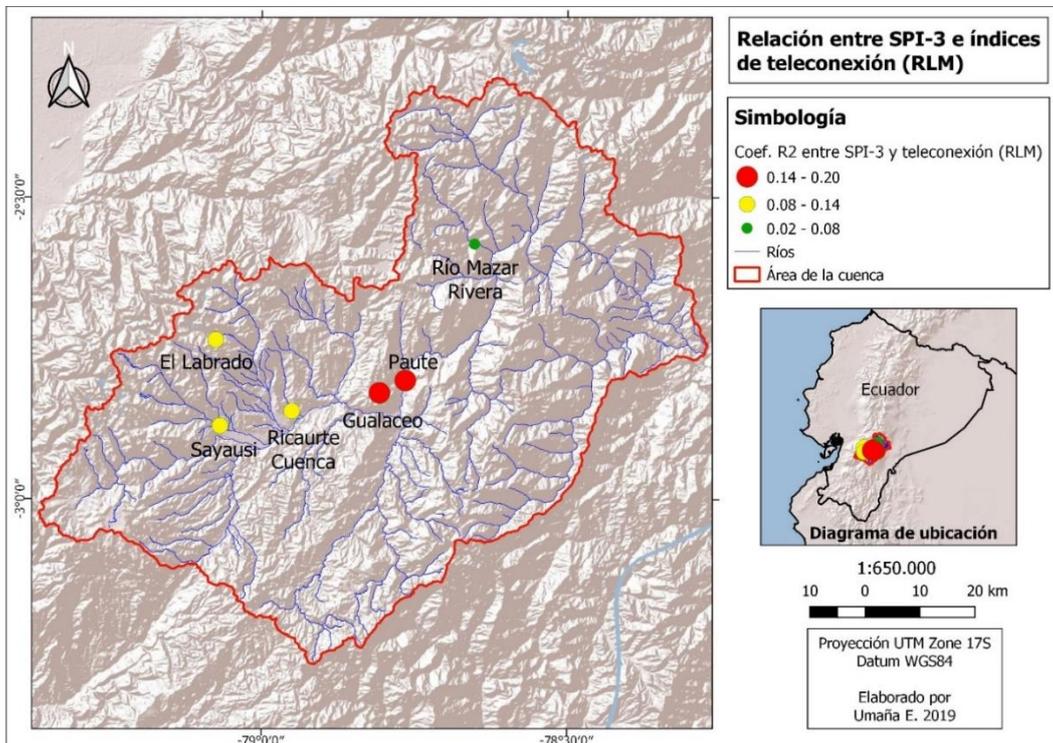


Figura 31. Mapa de coeficientes R^2 de la relación entre SPI-3 y los índices de teleconexión en las estaciones de la cuenca Paute según el modelo de regresión lineal múltiple.

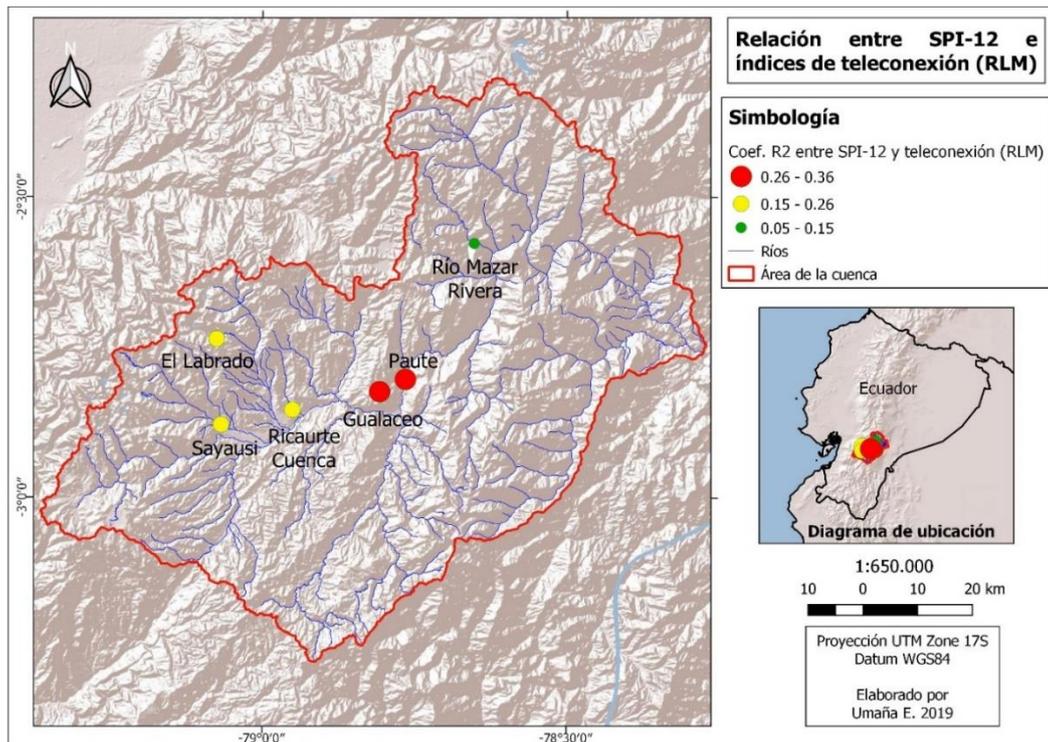


Figura 32. Mapa de coeficientes R2 de la relación entre SPI-12 y los índices de teleconexión en las estaciones de la cuenca Paute según el modelo de regresión lineal múltiple.

Los mapas de las figuras 33 y 34 representan la variabilidad de la relación SPI y los índices de teleconexión según la regresión RF. Al igual que en los mapas de las figuras 31 y 32, el SPI trimestral registra a Gualaceo y Paute como las estaciones con mayor coeficiente R^2 ; no obstante, a diferencia de la RLM, las estaciones Sayausi y Ricaurte Cuenca son las que presentan los menores coeficientes. A escala anual del SPI, las estaciones El Labrado, Ricaurte Cuenca y Paute se ubican dentro del rango superior del coeficiente R^2 , mientras que Río Mazar Rivera se encuentra en el rango más bajo.

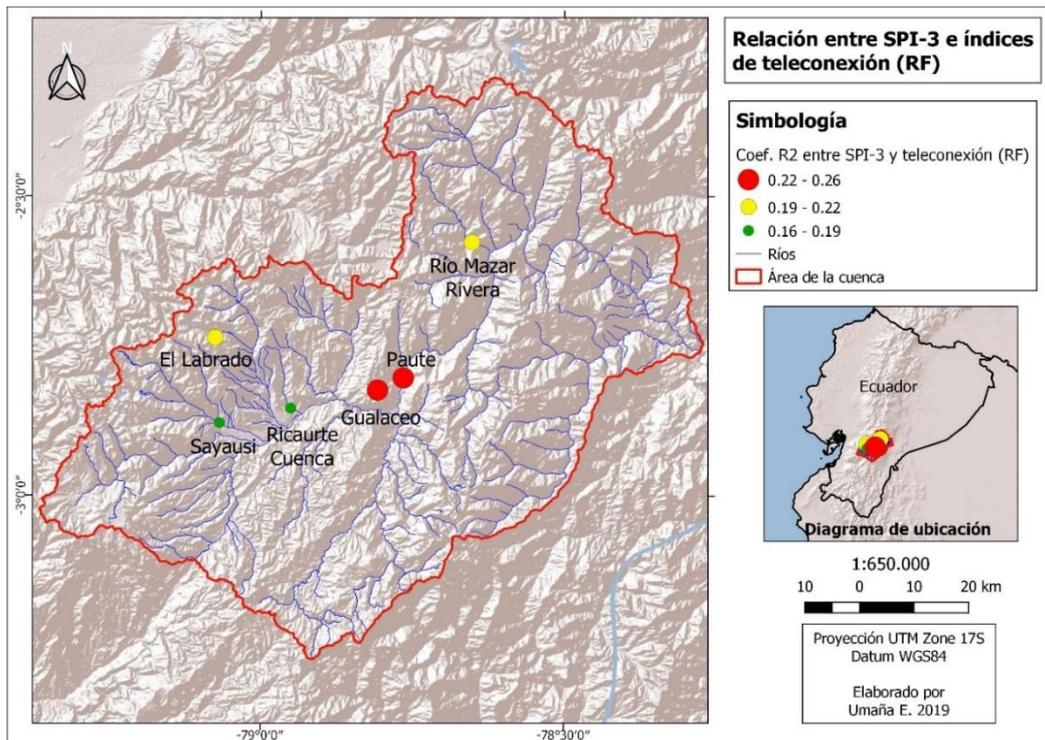


Figura 33. Mapa de coeficientes R^2 de la relación entre SPI-3 y los índices de teleconexión en las estaciones de la cuenca Paute según el modelo de regresión Random Forest.

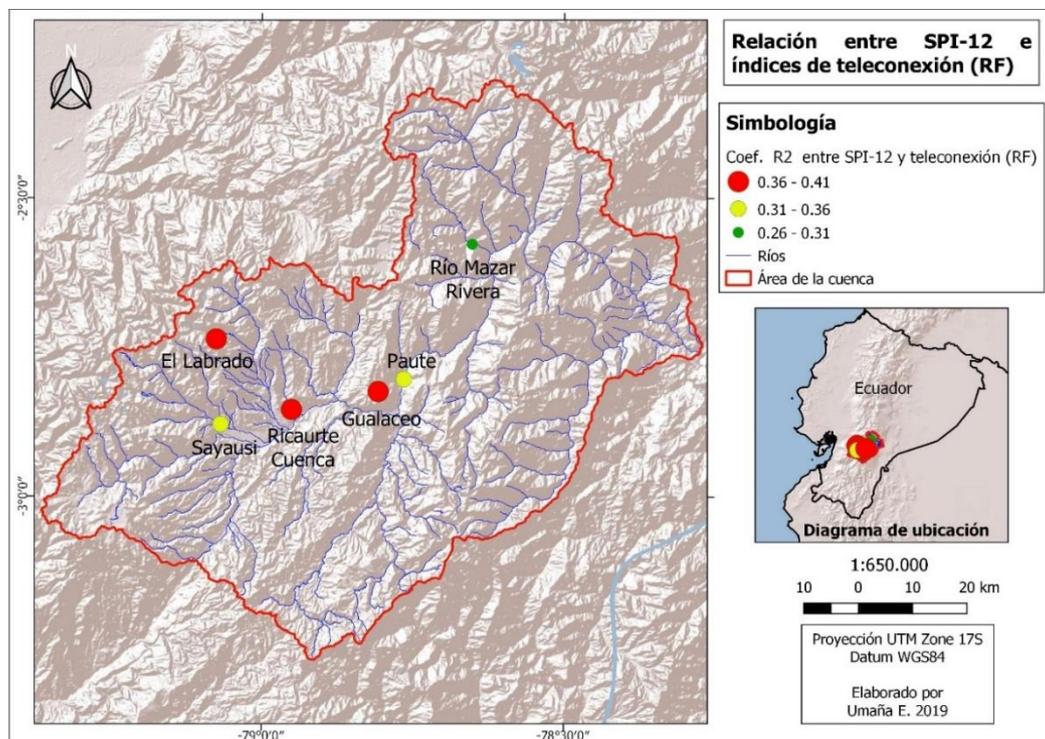


Figura 34. Mapa de coeficientes R^2 de la relación entre SPI-12 y los índices de teleconexión en las estaciones de la cuenca Paute según el modelo de regresión Random Forest.

3.5. Análisis de las series temporales del SPI-12 y los índices de teleconexión de mayor importancia según la regresión RF.

El análisis de las series temporales del SPI y los índices de teleconexión de mayor importancia, resulta de interés para identificar períodos de sequía que pueden estar relacionadas a la teleconexión. Se eligió la serie temporal de 12 meses debido a que presenta un mayor coeficiente R^2 en los modelos de regresión. Debido a que la regresión RF es más robusto y completo en comparación a la RLM, se utilizó este método para seleccionar los índices de mayor importancia en cada una de las estaciones que se analizan a continuación.

La Figura 35 muestra las series temporales del SPI-12 de la estación Corralillo y los dos índices de teleconexión de mayor importancia según la regresión RF. La fase negativa de la AMO que ocurrió entre 1965 a 1994 (Alexander et al. 2014), coincide con los años más secos del período de estudio. En contraparte, durante la fase cálida de la AMO que inició en 1995, hay una tendencia a SPI positivos y de sequías con menor duración y magnitud. Este comportamiento multidecenal puede ser explicado por el efecto modulador de la AMO en la variabilidad del ENOS, (Dong et al. 2002; Dong et al. 2006; Timmerman et al. 2007; Kayano y Buccioli, 2014). La fase fría de la AMO se ha relacionado con una mayor frecuencia e intensidad de los extremos cálidos y fríos del ENOS, en contraparte, la fase cálida de la AMO ha sido vinculada con una menor frecuencia de las fases extremas del ENOS (Kayano y Buccioli, 2014).

El MEI muestra también una relación estrecha con el SPI. En general, las fases positivas del MEI están vinculadas con oscilaciones negativas del SPI y viceversa, con excepciones en los años 1981, 1987, y el período 1993-1994. Las fases cálidas del ENOS de los años 1976-1977, 1977-1978, 1979-1980, 1982-1983 y 1986-1987 (Null, 2019) se ven reflejadas en los valores negativos del SPI. Un aspecto a destacar, es que durante los eventos del Niño categorizados como débiles entre los años 1976 a 1980 (Null, 2019), se registraron las sequías de mayor magnitud y duración, mientras que durante el Niño categorizado como muy fuerte ocurrido entre los años 1982-1983, se registraron las sequías de mayor intensidad.

Hubo períodos del Niño donde no se registraron sequías, al menos en la estación Corralillo. Un caso particular es el del Niño 1997-1998, categorizado como muy fuerte (Null, 2019), ya que no tuvo un efecto significativo en el

desarrollo de sequías en las estaciones estudiadas. Asimismo, períodos cálidos del ENOS como el de los años 1990-1991, 1994-1995, 2002-2003, 2006-2007 y 2009-2010 (Null, 2019), no hubo sequías detectadas por el SPI. Las estaciones seleccionadas tuvieron como aspecto en común, que las sequías detectadas después del año 1987 fueron de intensidad moderada y de corta duración.

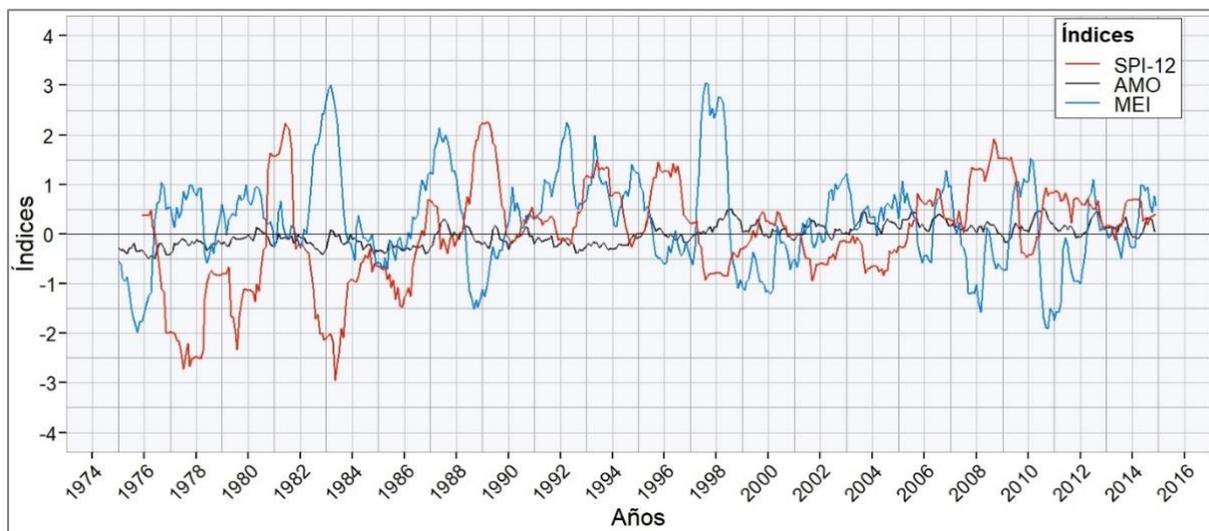


Figura 35. Índice estandarizado de precipitación a escala temporal de 12 meses de la estación Corralillo, cuenca Tempisque-Bebedero, y los índices de teleconexión AMO y MEI.

El gráfico de la Figura 36 muestra el SPI-12 de la estación Pueblo Rico de la cuenca San Juan y los índices de teleconexión de mayor importancia en la regresión RF. En las series temporales del SPI y el MEI, es posible identificar un patrón similar al caso de la cuenca Tempisque-Bebedero, en el cual las fases positivas del MEI se asocian a SPI negativos, y de forma inversa. Los eventos cálidos del ENOS registrados en los años 1976-1977, 1977-1978, categorizados como débiles (Null, 2019), generaron sequías moderadas de 3 meses de duración máxima de acuerdo al SPI-12, mientras que El Niño de 1982-1983 categorizado como muy fuerte, no estuvo relacionada con alguna sequía en la estación estudiada. Las fases cálidas de los años 1986-1987, 1987-1988, 1990-1991, 1997-1998, 2002-2003, 2004-2005 y 2006-2007 descritas por Null (2019), coinciden con déficits que el SPI detectó. Durante el Niño de 1991-1992 se registraron las sequías de mayor magnitud y duración en la cuenca, mientras que durante el Niño 1997-1998 se registraron sequías severas, pero de menor duración que la anterior.

La PDO fue el índice de teleconexión más importante a escala anual del SPI en la cuenca San Juan. El gráfico muestra un patrón similar en las oscilaciones positivas y negativas de la PDO y el MEI. La relación entre el PDO, ENOS y las sequías en Sudamérica han sido descritas en varias investigaciones, como los realizados por Mantua y Hare (2002), Andreoli y Cayano (2005) y Wang et al. (2014). Existe evidencia de que la fase cálida de la PDO está relacionada con períodos secos en América Central y el norte de Sudamérica (Mantua y Hare, 2002), asimismo se le atribuye el calentamiento por encima del promedio de las aguas en el noreste del Océano Pacífico, la costa de las Américas y en el centro oeste del Pacífico Tropical (Andreoli y Cayano, 2005; Zhang et al., 1997). Además se ha descubierto que la PDO en su fase cálida, intensifica los efectos del Niño y la Niña, mientras que la fase fría de la PDO los efectos del ENOS se amortiguan (Wang et al., 2014).

Los períodos secos más importantes registrados en la cuenca San Juan ocurrieron precisamente durante la fase cálida del PDO (1976-2000), donde destacan los eventos del 1991-1992 y 1997-1998. Una pequeña oscilación positiva del PDO entre 2002-2004 también coincide con varios eventos de sequía en esos años.

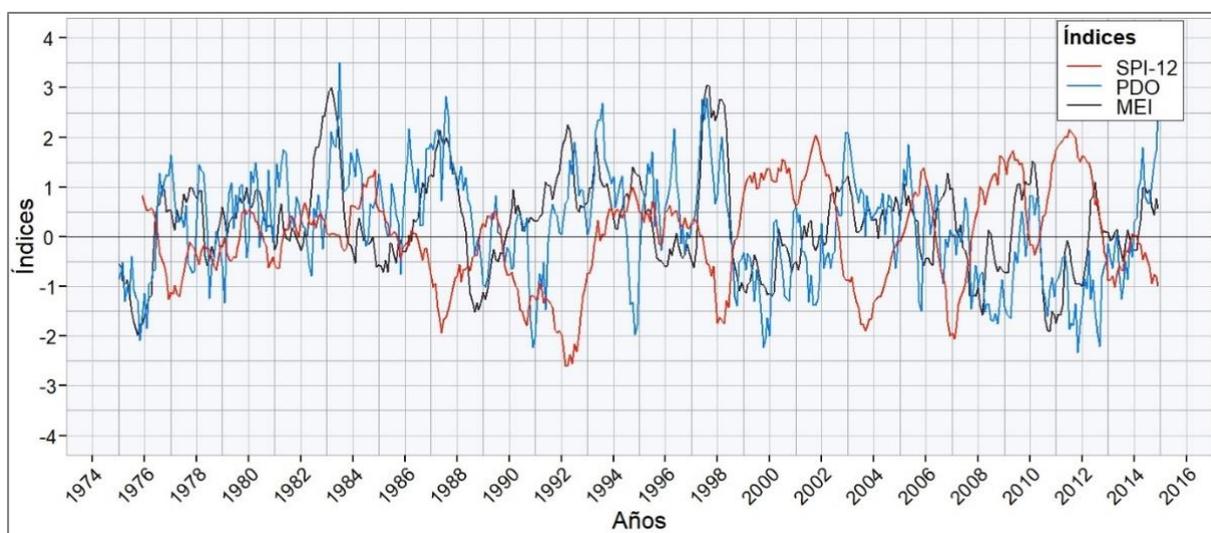


Figura 36. Índice estandarizado de precipitación a escala temporal de 12 meses de la estación Pueblo Rico, cuenca San Juan, y los índices de teleconexión PDO y MEI.

Las series temporales del SPI-12 de la estación Cedros en la cuenca Lengupá y los índices AMO y MEI, se muestran en la Figura 37. Durante la fase fría de la AMO, que culmina aproximadamente en 1995, el SPI tiende a valores

positivos, a excepción de los años 1976 y el período 1989-1990. A pesar de que la fase cálida de la AMO inicia en 1995, es a partir del año 2000 donde el SPI presenta una tendencia a valores negativos.

Las series temporales del SPI-12 y el MEI presentan algunas similitudes en sus oscilaciones, sin embargo, no muestra una tendencia clara. Los períodos de la Niña caracterizados por Null (2019) de los años 1975-1976 y 1988-1989, coinciden una sequía extrema en 1976 y sequías moderadas entre los años 1989-1990. Asimismo, durante los eventos del Niño de los años 1977-1978, 1979-1980, 1982-1983, 1986-1987, 1990-1991, 1997-1998 (Null, 2019), hubo algunos picos positivos del SPI. De acuerdo con la interpretación de Montealegre (2014), los efectos del Niño en la mayor parte de Colombia se manifiestan con disminución de los volúmenes de precipitación, a excepción del sector pacífico sur, suroccidente de la Amazonía colombiana y los piedemontes de la llanura oriental, los cuales experimentan precipitaciones superiores al promedio durante la fase cálida del ENOS y una disminución de la precipitación durante la fase fría. Precisamente la cuenca Lengupá se encuentra en el sector oriental de la cordillera de los andes, en una zona cercana al piedemonte de la llanura oriental colombiana, también conocida como la Orinoquía, lo cual puede explicar el comportamiento de las anomalías positivas del SPI en durante la fase cálida del ENOS descrita anteriormente.

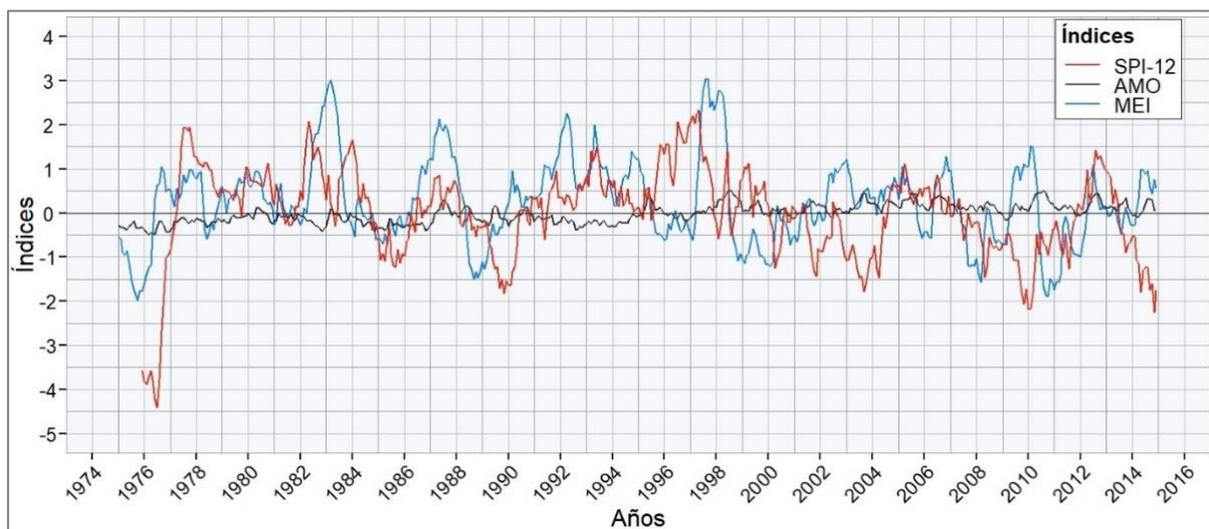


Figura 37. Índice estandarizado de precipitación a escala temporal de 12 meses de la estación Cedros, cuenca Lengupá, y los índices de teleconexión AMO y MEI.

La Figura 38 muestra el SPI-12 de la estación El Labrado en la cuenca Paute y los índices de teleconexión de mayor importancia en la regresión RF. Las series temporales del SPI y del TNI presentan una tendencia similar en sus oscilaciones positivas y negativas, no obstante, en los períodos 1993-1997, 2006-2007 y 2010-2011, se comportan de forma opuesta. La relación del TNI y las precipitaciones en Ecuador, ha sido estudiado por Campozano et al. (2014), donde se detalla que los valores positivos de TNI están relacionados con un aumento en las precipitaciones en todo Ecuador.

El Niño 4, presenta en términos generales, una tendencia opuesta al SPI, en la cual las anomalías positivas del Niño 4 se corresponden con anomalías negativas en el SPI y viceversa. Sin embargo durante los eventos muy fuertes del Niño (1982-1983 y 1997-1998) el SPI tiende a valores positivos. Este comportamiento del ENOS en la región andina ha sido estudiado por Vuille et al. (2000), quienes sostienen que este tipo de eventos genera respuestas opuestas de precipitación entre el este y el oeste de la cordillera de los Andes. Hidalgo (2017) afirma que durante la fase cálida del ENOS, la región interandina de Ecuador experimenta, por lo general, un aumento en temperatura junto a una disminución de la humedad relativa y las precipitaciones, no obstante cuando hay eventos muy fuertes del Niño, las precipitaciones aumentan. Lo contrario ocurre durante la fase fría, ya que la temperatura disminuye, mientras que la humedad relativa y las precipitaciones tienden a aumentar.

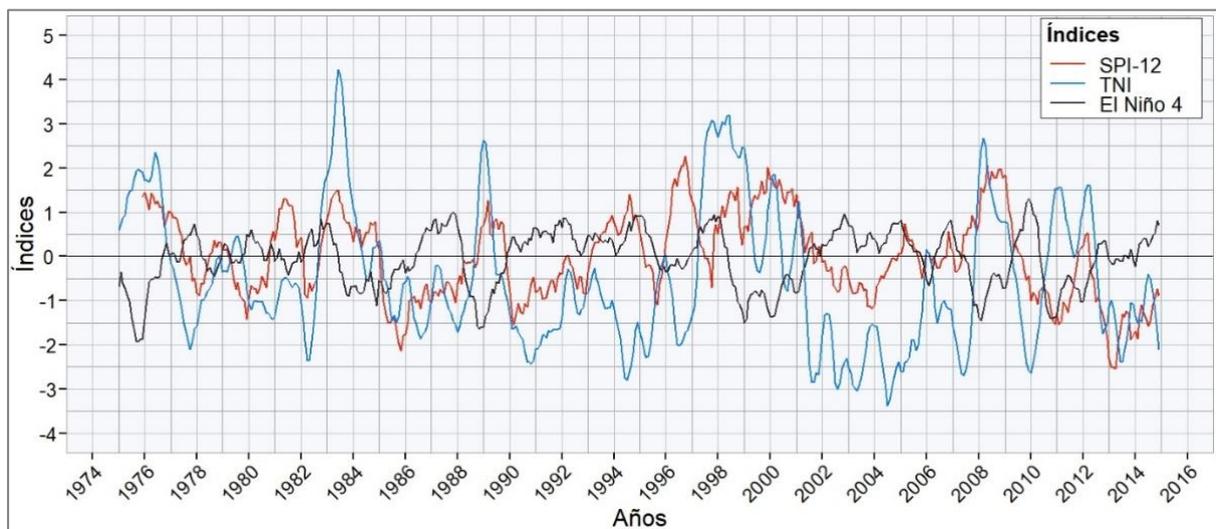


Figura 38. Índice estandarizado de precipitación a escala temporal de 12 meses de la estación El Labrado, cuenca Paute y los índices de teleconexión TNI y El Niño 4.

En la figura 39 se muestra el gráfico de las series temporales del SPI-12 de la estación Ushcurrumi en la cuenca Jubones y los índices de teleconexión de mayor importancia en la regresión RF. La serie temporal del TNI se comporta de forma similar al SPI, las cuales presentan correspondencias en las anomalías positivas y negativas, aunque no ocurre siempre. De forma similar que en la cuenca Paute, el TNI está muy relacionado con la variabilidad de las precipitaciones, en donde los valores positivos del TNI se relacionan con incrementos en la precipitación (Campozano et al., 2014). Respecto al Niño 4, no se observa una tendencia clara en las series temporales, sin embargo, es posible identificar valores de SPI positivos durante los eventos del Niño más intensos de los años 1982-1983 y 1997-1998.

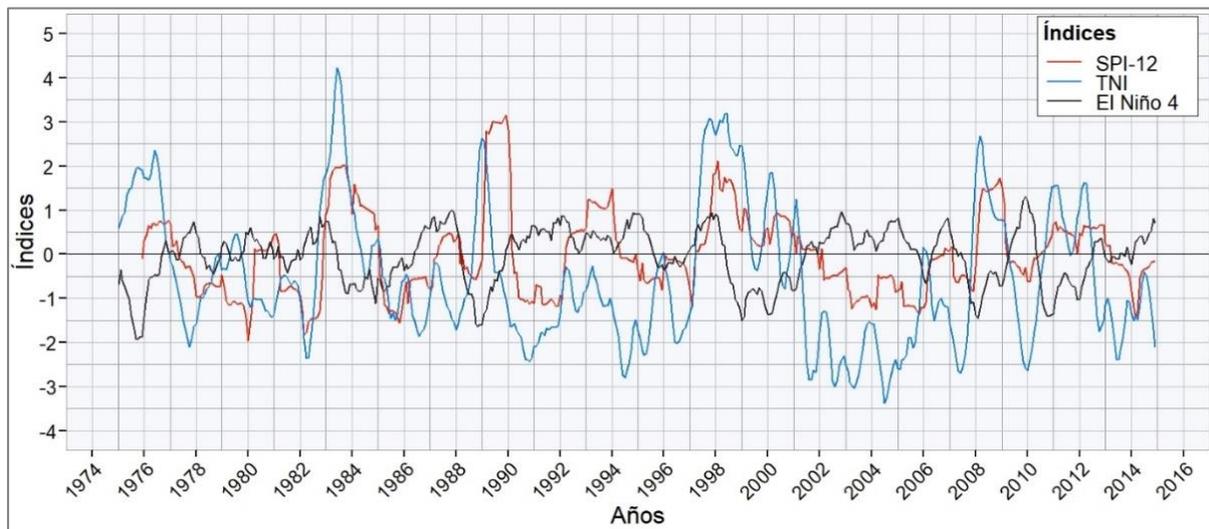


Figura 39. Índice estandarizado de precipitación a escala temporal de 12 meses de la estación Ushcurrumi, cuenca Jubones, y los índices de teleconexión TNI y El Niño 4.

El análisis descrito en los párrafos anteriores mostró cómo la teleconexión se relaciona con el comportamiento de las sequías y la precipitación en la región. Sin embargo, éste representa un pequeño esbozo con base en los datos disponibles, para comprender el un fenómeno tan complejo como la sequía.

Capítulo IV. Comparación del comportamiento de la sequía en las cuencas tropicales de Costa Rica, Colombia y Ecuador, y su relación con la teleconexión

En los capítulos anteriores se profundizó en la caracterización de las sequías mediante los parámetros de intensidad, duración, magnitud, frecuencia y probabilidad de ocurrencia. Así mismo se analizó la relación del SPI con los índices de teleconexión y la importancia relativa de cada uno de éstos. El presente capítulo pretende comparar, y analizar las diferencias y semejanzas del comportamiento de las sequías en las cuencas tropicales estudiadas.

4.1. Frecuencia y duración total de las sequías

La frecuencia y duración promedio de las sequías agrícolas de acuerdo a su categoría de intensidad están disponibles en la Tabla 2 (Capítulo II). Las sequías moderadas son más frecuentes en las cuencas ecuatorianas Jubones y Paute; mientras que en las cuencas San Juan y Tempisque-Bebedero son menos frecuentes. En cuanto a las sequías severas, las cuencas andinas Paute y Lengupá presentaron el mayor número de sequías, mientras que en la cuenca Tempisque-Bebedero fue la que tuvo menor número de eventos en esta categoría. Por otro lado, los eventos extremos son más frecuentes en la cuenca Tempisque-Bebedero, que tuvo 5 sequías de este tipo, en contraste con la cuenca Jubones que no presentó ningún evento de sequía extrema.

La cuenca San Juan registra el mayor número de meses bajo alguna categoría de sequía, con un total de 82. Siguiendo el orden de duración total, la cuenca Paute estuvo 74 meses en sequía, Tempisque-Bebedero 73, Lengupá 72 y Jubones 56 meses. En cuanto a las sequías moderadas, las cuencas Paute y Jubones estuvieron más meses bajo esa categoría (39 meses), en contraste con la cuenca Tempisque-Bebedero, que fue la que registró menor duración (27 meses). La cuenca San Juan registró la mayor duración promedio de sequías severas (44 meses), mientras que Jubones tuvo el menor registro de duración de sequías severas (18 meses). Tempisque-Bebedero es la cuenca que registra mayor duración de las sequías extremas (28 meses), en contraste con las cuencas San Juan (4 meses) y Jubones que no tuvo registros de sequías extremas.

Las sequías hidrológicas, descritas en la Tabla 3 (Capítulo II) mostraron tendencias similares a las sequías agrícolas. Las cuencas Paute y Jubones presentaron la mayor frecuencia y duración total de sequías moderadas; mientras que la cuenca Tempisque-Bebadero obtuvo el menor registro en esta categoría. No obstante, Tempisque-Bebadero es la cuenca con mayor número de sequías extremas y la que registró la mayor duración total, en contraparte con las cuencas Jubones y San Juan que no tuvieron registros de sequías en esta categoría. Las sequías severas son más frecuentes y presenta mayor duración total en la cuenca San Juan, mientras que en la cuenca Tempisque-Bebadero son menos frecuentes y de menor duración.

La cuenca San Juan, al igual que en las sequías agrícolas, fue la que estuvo mayor cantidad de meses bajo alguna categoría de sequía, con un total de 77 meses. Siguiendo el orden descendiente, la cuenca Paute registró un total de 73 meses, Jubones 71, Lengupá 70 y Tempisque-Bebadero 47 meses. Las sequías moderadas, como se mencionó en el párrafo anterior, presentan mayor duración en las cuencas Jubones y Paute, con un total de 62 y 43 meses respectivamente; mientras que la cuenca Tempisque-Bebadero obtuvo el menor registro, con un total de 13 meses. Las sequías severas presentaron mayor duración en la cuenca San Juan, con un total de 45 meses, en contraste con la cuenca Jubones que estuvo 9 meses en esta categoría. Tempisque-Bebadero estuvo en promedio 24 meses en sequía extrema, mientras que las cuencas Jubones y Paute no registraron sequías extremas.

La Figura 40 sintetiza mediante la probabilidad de ocurrencia anual, la frecuencia de la sequía según la categoría de intensidad, de acuerdo al SPI trimestral y anual. La probabilidades de ocurrencia de sequías moderadas son más altas en las cuencas ecuatorianas Jubones y Paute; mientras que las sequías extremas presentan mayor probabilidad en la cuenca Tempisque-Bebadero. Las cuencas Paute, Lengupá y San Juan presentan probabilidades similares en la ocurrencia de sequías severas a escala trimestral, sin embargo a escala anual, la cuenca San Juan es la que presenta mayor probabilidad.

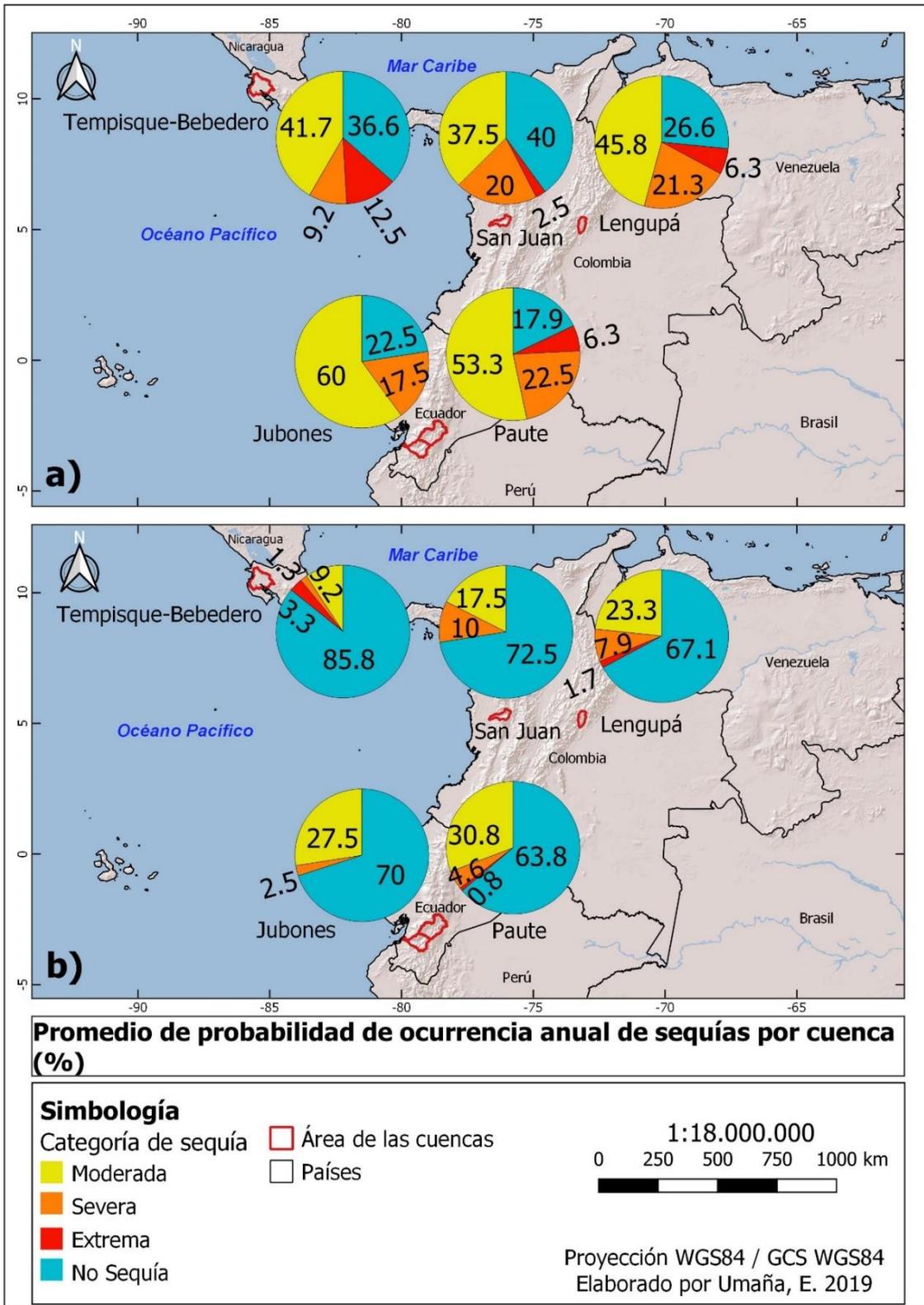


Figura 40. Probabilidad de ocurrencia de sequías a) Sequías Agrícolas (SPI-3) b) Sequías Hidrológicas (SPI-12).

4.2. Principales eventos de sequía de acuerdo a la magnitud

En la Tabla 27 se detallan las sequías agrícolas de mayor magnitud en cada cuenca, con su respectiva duración e intensidad. La estación La Guinea en la cuenca Tempisque-Bebedero, registró la sequía de mayor magnitud, ocurrida entre julio de 1976 a marzo de 1978, con una duración de 21 meses y una magnitud de 43.98. En la cuenca San Juan, la sequía de mayor magnitud ocurrió entre marzo de 2006 y febrero de 2007, con una magnitud de 18.78 y de 12 meses de duración. En Lengupá, la sequía de mayor magnitud se desarrolló en la estación Rondón entre marzo 1986 a enero de 1987, de 11 meses de duración y de magnitud 27.12. Por su parte, la cuenca Paute tuvo la sequía de mayor magnitud en la estación Gualaceo, entre agosto de 1987 y enero de 1988, con una magnitud de 15.96 y de categoría extrema. Por último, la estación Ushcurrumi en la cuenca Jubones registró la sequía de mayor magnitud entre junio y noviembre de 1996, de 6 meses de duración y de categoría moderada.

Tabla 27. Sequías agrícolas (SPI-3) de mayor magnitud por cuenca.

Cuenca	Estación	Duración (meses)	Magnitud	Intensidad	Categoría
Tempisque-Bebedero	La Guinea	Jul 1976-Mar 1978 (21)	43.98	-2.09	Extrema
San Juan	Pueblo Rico	Mar 2006-Feb 2007 (12)	18.78	-1.57	Severa
Lengupá	Rondón	Mar 1986-Ene 1987 (11)	27.12	-2.47	Extrema
Paute	Gualaceo	Ago 1987-Ene 1988 (6)	15.96	-2.66	Extrema
Jubones	Ushcurrumi	Jun 1996-Nov 1996 (6)	7.19	-1.20	Moderada

La Tabla 28 resume los eventos de sequía hidrológica de más importantes de acuerdo a su magnitud en cada cuenca, con su respectiva duración, intensidad y categoría. Al igual que en la escala trimestral, la cuenca Tempisque-Bebedero registró la sequía de mayor magnitud, específicamente en la estación Gramita, con una magnitud de 70.93, de 25 meses de duración, ocurrida entre agosto de 1976 a agosto de 1978. En la cuenca San Juan, la sequía de mayor magnitud ocurrió entre abril de 1991 y diciembre de 1992, con una duración de 21 meses y de intensidad severa. La cuenca Lengupá tuvo la sequía de mayor magnitud en la estación Rondón, entre octubre de 1985 y julio de 1987, con una magnitud de 65.27 y una duración de 22 meses. El Labrado fue la estación que tuvo la sequía

hidrológica de mayor magnitud en la cuenca Paute, con una duración de 25 meses, entre setiembre de 2012 y setiembre de 2014.

Tabla 28. Sequías hidrológicas (SPI-12) de mayor magnitud por cuenca.

Cuenca	Estación	Duración (meses)	Magnitud	Intensidad	Categoría
Tempisque-Bebedero	Gramita	Ago 1976-Ago 1978 (25)	70.93	-2.84	Extrema
San Juan	Pueblo Rico	Abr 1991-Dic 1992(21)	37.89	-1.80	Severa
Lengupá	Rondón	Oct 1985-Jul 1987 (22)	65.27	-2.97	Extrema
Paute	El Labrado	Set 2012-Set 2014 (25)	41.20	-1.65	Severa
Jubones	Ushcurrumi	Mar 1979-Mar 1980 (13)	15.99	-1.23	Moderada

En resumen, la cuenca Tempisque-Bebedero presenta las sequías agrícolas e hidrológicas con mayor potencial de daño, debido a su prolongada duración e intensidad, no obstante, las sequías más fuertes se presentaron únicamente entre los años 1975 y 1987. Por otro lado, las sequías con menor severidad ocurren en la cuenca Jubones, donde se registran principalmente sequías moderadas y de corta duración,

4.3. Relación de las sequías con la teleconexión.

Uno de los aspectos más importantes de esta investigación es comprender los contrastes espaciales del comportamiento de la precipitación y su relación con la teleconexión entre las cuencas ubicadas en la vertiente del Pacífico y las cuencas andinas pertenecientes a la vertiente del Atlántico. La tendencia de los coeficientes de determinación R^2 demuestra que las estaciones de las cuencas ubicadas en la vertiente pacífica son más susceptibles a la influencia de la teleconexión, es especial los efectos del ENOS. Es más evidente este comportamiento a escala trimestral del SPI, ya que en promedio, los coeficientes R^2 de las cuencas Jubones, San Juan y Tempisque-Bebedero superan el promedio de las cuencas Lengupá y Paute, tanto el RLM como en la regresión RF. A escala anual del SPI, de acuerdo a la regresión RF el patrón se repite, sin embargo, la RLM indicó una ligera diferencia en el promedio de los coeficientes R^2 a favor de la cuenca Paute sobre la cuenca Tempisque-Bebedero. El promedio del

coeficiente R^2 en cuenca Lengupá es el menor de todas las cuencas estudiadas, tanto a escala trimestral como anual del SPI, y en los dos métodos de regresión utilizados; mientras que la cuenca Jubones es la que registró el coeficiente R^2 más alto de todas las cuencas estudiadas, en ambas escalas temporales y en ambos métodos de regresión.

La relación del SPI con los índices de teleconexión difiere de una cuenca a otra e incluso varía dentro de la misma cuenca, como en el caso de Lengupá y Paute. Sin embargo, se pueden evidenciar algunos rasgos en común entre las cuencas, principalmente relacionados con el fenómeno ENOS. Tal es el caso de las cuencas Tempisque-Bebadero en Costa Rica y la cuenca San Juan en Colombia, donde se evidenció la importancia de los índices MEI y el Niño 3.4 en los modelos de regresión utilizados. Las figuras 35 y 36 (Capítulo III) muestran la relación del índice MEI con el SPI de las estaciones Corralillo y Pueblo Rico respectivamente, donde se observa la relación de la fase cálida del Niño con la ocurrencia de sequías. Sin embargo, es importante mencionar que no todos los eventos del Niño provocan sequías, tal y como se mencionó en la sección 3.4. Pese a que tiene una innegable relevancia en la variabilidad de la precipitación, el ENOS no es el único factor influyente, ya que fenómenos como la AMO y la PDO juegan un papel importante en la región.

A diferencia de Tempisque-Bebadero y San Juan, las sequías en la cuenca Jubones presentan un comportamiento distinto en relación con el fenómeno ENOS. Los eventos del Niño más fuertes, registrados en los años 1982-1983 y 1997-1998 (Null, 2019), estuvieron relacionados con incrementos en las precipitaciones, tal y como se muestra en la serie temporal de la Figura 39. Sin embargo, durante el evento débil del Niño 1979-1980 ocurrió la sequía hidrológica de mayor magnitud y duración, así mismo durante el evento de 1991-1992 donde hubo sequías moderadas de corta duración. En términos generales, la estación estudiada no refleja déficits significativos durante las fases frías del ENOS, salvo algunas excepciones como en los eventos de la Niña leves en los años 1984-1985 y 2005-2006 (Null, 2019).

Las cuencas San Juan y Jubones (sección 2.2 y 2.5), del pacífico colombiano y ecuatoriano, presentaron sequías agrícolas e hidrológicas entre los años 1990-1992. No obstante, la afectación más intensa ocurrió en el pacífico colombiano, donde se registraron sequías severas; mientras que en el pacífico

ecuatoriano las sequías fueron de intensidad moderada. La injerencia del Niño 1991-1992 en las sequías registradas en la cuenca San Juan es clara, sin embargo, en la cuenca Jubones, el efecto del Niño se manifestó contrario a lo que se espera en esta región, que normalmente recibiría lluvias por encima del promedio. Las sequías registradas en las cuencas San Juan y Jubones durante 1990, no aparentan estar relacionados con el fenómeno ENOS, pero es destacable la coincidencia de los períodos secos en ese año.

En las cuencas Jubones y Paute hubo sequías agrícolas e hidrológicas durante el período 1985-1986. Paute registró sequías de intensidad severa y extrema, mientras que Jubones se vio afectada por sequías moderadas. Valarezo (2017) y Pacheco et al. (2017) registraron durante el año 1985, el evento de sequía más destacado en la cuenca del Paute, según el SPI. El ENOS es una posible causa del origen de esta sequía en particular, ya que durante los años 1984-1985 se desarrolló una Niña de intensidad débil (Null, 2019), que pudo influir en la aparición de sequías tanto en la costa como en la sierra ecuatoriana. Otro factor del ENOS, es la relación del TNI con la precipitación en Ecuador (descrito en el capítulo III) ya que mostró ser índice de mayor importancia en la RLM y la regresión RF. Los valores positivos del TNI se asocian con anomalías positivas de precipitación en Ecuador (Campezano et al., 2014), así mismo, durante oscilaciones negativas del TNI, las series temporales del SPI en las cuencas Jubones y Paute, muestran por lo general anomalías negativas de precipitación.

Es importante destacar el rol de los índices PDO y AMO en relación con las sequías y la modulación de los efectos del ENOS. En la sección 3.5 se analizó cómo estos dos fenómenos influyen en el desarrollo de sequías en la zona tropical. La AMO es el índice de mayor importancia en las cuencas Tempisque-Bebedero y Lengupá según la regresión RF, sin embargo sus efectos son distintos dependiendo de la fase en que se encuentre. Durante la fase fría (1965-1994), la cuenca Tempisque-Bebedero experimentó sequías más intensas y duraderas; mientras que en la cuenca Lengupá, específicamente en la estación Cedros, mostró condiciones más húmedas y registró sequías menos intensas. Lo contrario sucede durante la fase cálida (1995 en adelante), en la cual ocurre una disminución de los efectos del ENOS, manifestándose con sequías menos intensas y con tendencias húmedas en la cuenca Tempisque-Bebedero; mientras que en la cuenca Lengupá se relaciona con condiciones más secas.

La PDO es el índice de mayor importancia en la cuenca San Juan a escala anual del SPI según la regresión RF. Durante la fase cálida de la PDO (1976-2000) ocurrió el evento más importante de sequía en la cuenca, específicamente en los años 1991-1992, así como otros períodos importantes como los de 1987 y 1997-1998. Durante la fase fría (2000 en adelante) el SPI muestra tendencias a condiciones más húmedas, a pesar de la ocurrencia de algunas sequías como las de los años 2003-2004 y 2006-2007 (Figura 15, Capítulo II).

Conclusiones

El estudio de la sequía en las cuencas tropicales de Costa Rica, Colombia y Ecuador constituye un aporte importante a la comprensión de la dinámica del fenómeno en la región, caracterizada por su vulnerabilidad ante este tipo de eventos. La comparación entre cuencas con rasgos geográficos diferentes, ofrece una perspectiva novedosa en el análisis de la sequía y la relación con la teleconexión.

La flexibilidad de las escalas temporales y la capacidad para comparar sitios con características climáticas distintas, hacen del SPI un índice de gran utilidad cuando únicamente hay disponibilidad de datos de precipitación. El uso del SPI trimestral y anual, permite el análisis de sequía de mediano a largo plazo, proporcionando las bases para el estudio de la sequía agrícola e hidrológica. No obstante, es importante señalar la debilidad del SPI para detectar sequías severas y extremas en zonas áridas y semiáridas, como el caso de la cuenca Jubones en Ecuador, donde no se registraron sequías de intensidad extrema.

Las cuencas ecuatorianas Jubones y Paute, evidenciaron una frecuencia mayor de sequías moderadas y un mayor número de meses bajo esa categoría, tanto a escala trimestral como anual del SPI. Las sequías severas son más frecuentes en las cuencas Paute y Lengupá a escala trimestral, aunque en la cuenca San Juan las sequías de este tipo se prolongaron durante más tiempo; a escala anual, San Juan registró la mayor frecuencia y duración total de sequías severas. La cuenca Tempisque-Bebadero es la que tuvo mayor frecuencia y duración de las sequías extremas en las dos escalas temporales.

La complementación de los métodos de regresión lineal múltiple y la regresión Random Forest contribuye a la solidez de los resultados de la relación del SPI y los índices de teleconexión. Ambos métodos arrojaron resultados similares respecto a los coeficientes, a pesar de las diferencias metodológicas. Random Forest demostró ser más eficiente cuando se tienen múltiples variables explicativas. Asimismo, la cuantificación de la importancia de las variables independientes es un aspecto valioso para identificar aquellos índices que están más relacionados con el comportamiento de la precipitación y las sequías, lo cual fue posible utilizando ambos métodos de regresión.

Las cordilleras constituyen un factor geográfico que modifica las condiciones de precipitación así como la influencia de fenómenos océano-atmosféricos a gran escala. Las características de las sequías y la influencia de la teleconexión varían notablemente de la vertiente del Pacífico a la vertiente del Atlántico, las cuales se encuentran divididas por la cordillera de los Andes, en el caso de las cuencas sudamericanas, y la cordillera volcánica de Guanacaste, en el caso de la cuenca Tempisque-Bebedero.

Las cuencas ubicadas en la vertiente del Pacífico (Tempisque-Bebedero, San Juan y Jubones) presentan una relación más fuerte con los índices de teleconexión que las cuencas andinas (Lengupá y Paute). Los coeficientes R^2 generados por los dos métodos de regresión utilizados demuestran las diferencias de la relación entre el SPI y la teleconexión de acuerdo a la ubicación de las cuencas. La cuenca Jubones, en el pacífico ecuatoriano, fue la que presentó el mayor coeficiente R^2 , mientras que Lengupá, ubicada en los andes colombianos, fue la que registró el menor promedio de R^2 .

Las sequías son fenómenos complejos, por lo tanto son el resultado de múltiples causas. Es común que se hable del ENOS como el causante de la variabilidad de la precipitación en la región, no obstante, existen otros fenómenos oceánico-atmosféricos que modulan el comportamiento del ENOS, tales como la AMO y la PDO. La influencia de la teleconexión varía de una cuenca a otra; y puede variar dentro de la misma cuenca, especialmente en las cuencas andinas Lengupá y Paute, las cuales presentan un gran rango altitudinal y una orografía compleja.

En la cuenca Tempisque-Bebedero, el método de regresión RF registró a la AMO como el índice de mayor importancia a escala trimestral y anual del SPI. La RLM mostró los índices AMO, El Niño 3.4 y MEI como los más importantes en las dos escalas temporales de SPI. Lo anterior indica que la AMO es la principal teleconexión en la cuenca, superando inclusive la influencia del ENOS. Ambas teleconexiones están interrelacionadas, donde la AMO posee un efecto modulador en el ENOS.

En la cuenca San Juan, en el pacífico de Colombia, de acuerdo a ambos métodos de regresión el Niño 3.4 es el índice más importante a escala trimestral del SPI. A escala anual, El Niño 4 y la PDO son los índices de mayor importancia de acuerdo a la RLM y la regresión RF respectivamente. La PDO es un factor

modulador del fenómeno ENOS, y ambas teleconexiones en conjunto influyen en la variabilidad de la precipitación y el comportamiento de las sequías en la cuenca.

A pesar de la variabilidad en la cuenca Lengupá, la AMO, El Niño 4 y el TNI son los índices de mayor importancia en las estaciones estudiadas según la RLM y la regresión RF, en ambas escalas temporales. Sin embargo, la AMO es el índice más importante en las estaciones con el coeficiente R^2 más alto, lo cual evidencia el predominio de la teleconexión con los fenómenos océano-atmosféricos del Atlántico.

En la cuenca Paute, los índices Niño 4 y el TNI son los de mayor importancia a escala trimestral en la RLM y en la regresión RF; mientras que a escala anual lo son el TNI, El Niño 4 y la PDO en ambos métodos de regresión. Lo anterior indica que el ENOS ejerce una influencia notable en la región interandina de Ecuador, pese al aporte de las masas de aire que provienen de la Amazonía.

En la cuenca Jubones, el TNI es el índice más importante de acuerdo a la RLM y la regresión RF, tanto a escala trimestral como anual. Su ubicación en el Pacífico ecuatoriano, la hace muy susceptible a los efectos del ENOS.

La fase cálida del ENOS se manifiesta por lo general con sequías en las cuencas Tempisque-Bebedero y San Juan, y con precipitaciones superiores al promedio en la cuenca Jubones. En Paute, el efecto del Niño no manifestó un patrón muy claro, ya que durante los eventos muy fuertes de los años 1982-1983 y 1997-1998 se identifican períodos con precipitaciones superiores al promedio, pero en otros períodos del Niño menos intensos se observan déficits, sin llegar a categorizarse como sequías. Durante el Niño, la cuenca Lengupá mostró un incremento en las precipitaciones, especialmente durante los eventos más fuertes (1982-1983, 1997-1998); la fase fría, por el contrario no mostró un patrón claro, ya que algunos períodos mostraron déficits y en otros se mantuvo bajo condiciones normales o en superávit.

Recomendaciones

El SPI constituye una herramienta útil y sencilla de utilizar, que en conjunto con la información de los índices de teleconexión, generan información valiosa para el monitoreo de la sequía. La capacidad que ofrece el software libre, la disponibilidad de datos de variables climáticas de buena calidad y de datos periódicos de índices de teleconexión, facilitaría la implementación de un sistema de alerta temprana de sequía, capaz de generar información actualizada y de libre acceso al público.

Para la creación de un sistema de monitoreo de sequía en Costa Rica, se requiere un control estricto de las estaciones meteorológicas para garantizar la calidad de los datos, así como la inversión en equipo de medición para instalar nuevas estaciones. Además, es imprescindible la cooperación interinstitucional que permita que las instituciones públicas que tienen a cargo estaciones meteorológicas puedan compartir sus datos. Se recomienda la creación de un repositorio web que facilite el acceso a los datos para fines académicos y científicos.

A pesar de las bondades que ofrece el SPI, es un índice que únicamente toma en cuenta la precipitación para su cálculo. Además, presenta problemas cuando se analizan climas áridos y semiáridos, ya que suele no detectar sequías severas y extremas. Para monitorear la sequía lo ideal es combinar el uso del SPI con otros índices de sequía que registren el volumen del déficit, con el fin de tener mayor certeza en el pronóstico de las sequías. Si hay disponibilidad, se debe hacer uso de otras variables tales como caudal, temperatura, evapotranspiración, los cuales permitiría la implementación de otros índices más complejos.

Se debe considerar la utilización de productos globales de precipitación para realizar un estudio más amplio y preciso de la variabilidad espacial de las sequías y la relación con la teleconexión. La limitada disponibilidad de datos de estaciones meteorológicas es un problema común en la región, por lo tanto es importante recurrir a la información originada de sensores remotos para complementar los datos ya disponibles.

Con miras en el monitoreo de la sequía, se deben combinar los índices del ENOS con los índices AMO y PDO. Asimismo se debe explorar otros índices de teleconexión del Atlántico que pueden influir en la variabilidad de la precipitación

en la región. En las cuencas sudamericanas, especialmente las andinas, se deben investigar otros índices relacionados con la influencia de las masas de aire que provienen de la cuenca amazónica.

Bibliografía

- Alexander, M. A., Kilbourne, K. H., y Nye, J. A. (2014). Climate variability during warm and cold phases of the Atlantic Multidecadal Oscillation (AMO) 1871–2008. *Journal of Marine Systems*, 133, 14-26. Recuperado de <https://doi.org/10.1016/j.jmarsys.2013.07.017>
- Andreoli, R. V., y Kayano, M. T. (2005). ENSO-related rainfall anomalies in South America and associated circulation features during warm and cold Pacific decadal oscillation regimes. *International Journal of Climatology: A Journal of the Royal Meteorological Society*, 25(15), 2017-2030.
- Bamston, A., Chelliah, M., y Goldenberg, S. (1997). Documentation of a highly ENSO-related SST region in the equatorial Pacific: Research note. *Atmosphere-ocean*, 35(3), 367-383. Recuperado de <https://www.tandfonline.com/doi/pdf/10.1080/07055900.1997.9649597>
- Bastidas, M. (2014). *Evaluación exergética de la calidad del agua de tres ríos en Colombia* (tesis de maestría). Universidad Nacional de Colombia. Palmira, Colombia. Recuperado de <http://bdigital.unal.edu.co/47036/1/34561303-Mary.pdf>
- Behar, D. (2008). *Metodología de la investigación*. Editorial Shalom. Recuperado de <http://rdigital.unicv.edu.cv/bitstream/123456789/106/3/Libro%20metodologia%20investigacion%20este.pdf>
- Birkel, C. (2005a). Sequía en Centroamérica: implementación metodológica espacial para la cuantificación de sequías en el Golfo de Fonseca. *Revista Reflexiones*. 84(1), 57-70. Recuperado de <https://revistas.ucr.ac.cr/index.php/reflexiones/article/view/11413/10762>
- Birkel, C. (2005b). *Temporal and spatial variability of drought indices in Costa Rica* (Tesis de Diploma). Instituto de Hidrología de la Universidad Albert-Ludwigs-Freiburg. Friburgo, Alemania. Recuperado de http://www.hydrology.uni-freiburg.de/abschluss/Birkel_C_2005_DA.pdf
- Birkel, C. (2006). Sequía hidrológica en Costa Rica ¿Se han vuelto más severas y frecuentes en los últimos años?. *Revista Reflexiones*, 85 (1-2), 107-116. Recuperado de <https://revistas.ucr.ac.cr/index.php/reflexiones/article/view/11435/10784>

- Birkel, C., Brenes, A., y Sánchez, R. (2017). The Tempisque-Bebedero catchment system: energy-water-food consensus in the seasonally dry tropics of northwestern Costa Rica. En Al-Saidi, M., & Ribbe, L. (Eds.). Nexus Outlook: assessing resource use challenges in the water, energy and food nexus. Nexus Research Focus, TH-Koeln, University of Applied Sciences. Recuperado de https://oacg.fcs.ucr.ac.cr/images/Outlook-Nexus_Assessing_Resource_Use_Challenges.pdf
- Bocanegra, J. (2017). Hydrological drought assessment in the Tempisque-Bebedero catchment system in Costa Rica. (Tesis de maestría). Universidad San Luis Potosí, México. Recuperado de <https://epb.bibl.th-koeln.de/frontdoor/deliver/index/docId/1066/file/Thesis-Version+final-Bocanegra1.pdf>
- Cabezas, B., y Vangni, S. (2015). *Influencia del evento ENOS (El Niño Oscilación del Sur) sobre las precipitaciones en el Litoral Ecuatoriano*. (Bachelor's thesis, Facultad de Ciencias Naturales. Universidad de Guayaquil). Recuperado de <http://repositorio.ug.edu.ec/handle/redug/11526>
- Campozano, L., Ballari, D., y Célleri, R. (2014). Imágenes TRMM para identificar patrones de precipitación e índices ENSO en Ecuador. *Maskana*, 5, 185-191. Recuperado de <https://publicaciones.ucuenca.edu.ec/ojs/index.php/maskana/article/download/566/491>
- Castillo, R., Montero, R., Amador, J. y Durán, A. (2018). Cambios futuros en la precipitación y temperatura sobre América Central y el Caribe utilizando proyecciones climáticas de reducción a escala estadística. *Revista de Climatología*, 18, 1-12. Recuperado de http://www.kerwa.ucr.ac.cr/bitstream/handle/10669/75876/2018_01.pdf?sequence=1&isAllowed=y
- Cordero, I. (2013). *Evaluación de la gestión territorial de la cuenca del río Paute, estrategias y línea de acción para superarlas*. (Tesis de maestría). Universidad de Cuenca, Ecuador. Recuperado de <http://dspace.ucuenca.edu.ec/bitstream/123456789/3358/1/TESIS%20.pdf>
- Célleri, R., Willems, P., Buytaert, W., y Feyen, J. (2007). Space-time rainfall variability in the Paute basin, Ecuadorian Andes. *Hydrological Processes: An International Journal*, 21(24), 3316-3327.

- Damania, R., Desbureaux, S., Hyland, M., Islam, A., Moore, S., Rodella, A., Russ, J. y Zakeri, E. (2017). *Aguas Inexploradas. La nueva economía de la escasez y la variabilidad del agua*. Grupo del Banco Mundial. Recuperado de <https://openknowledge.worldbank.org/bitstream/handle/10986/28096/211179ovSP.pdf?sequence=5>
- Derksen, S., y Keselman, H. (1992). Backward, forward and stepwise automated subset selection algorithms: Frequency of obtaining authentic and noise variables. *British Journal of Mathematical and Statistical Psychology*, 45(2), 265-282.
- Domínguez, J. (2013). Evaluación de la gestión territorial de la cuenca del río Paute, estrategias, y líneas de acción para superarlas (Tesis de Maestría). Facultad de Arquitectura y Urbanismo. Universidad de Cuenca, Ecuador. Recuperado de <http://dspace.ucuenca.edu.ec/jspui/bitstream/123456789/3358/1/TESIS%20.pdf>
- Dong, B., & Sutton, R. (2002). Adjustment of the coupled ocean-atmosphere system to a sudden change in the thermohaline circulation. *Geophysical Research Letters*, 29(15), 18-1. Recuperado de <https://agupubs.onlinelibrary.wiley.com/doi/epdf/10.1029/2002GL015229>
- Dong, B., Sutton, R., & Scaife, A. (2006). Multidecadal modulation of El Niño-Southern Oscillation (ENSO) variance by Atlantic Ocean sea surface temperatures. *Geophysical Research Letters*, 33(8). Recuperado de <https://agupubs.onlinelibrary.wiley.com/doi/pdf/10.1029/2006GL025766>
- Enfield, D. B., Mestas-Núñez, A. M., & Trimble, P. J. (2001). The Atlantic multidecadal oscillation and its relation to rainfall and river flows in the continental US. *Geophysical Research Letters*, 28(10), 2077-2080. Recuperado de <https://www.fws.gov/bhg/PDFs/enfield2001.pdf>
- Edwards, D. (1997). *Characteristics of 20th century drought in the United States at multiple time scales* (Tesis de Maestría). Department of Atmospheric Science, Universidad del Estado de Colorado. Fort Collins, Colorado. Recuperado de <http://www.dtic.mil/dtic/tr/fulltext/u2/a325595.pdf>
- Fajardo, J. (2010). *Desarrollo de una propuesta de gerenciamiento del recurso hídrico en la cuenca del Jubones* (Tesis de licenciatura). Universidad

- Politécnica Salesiana, Quito, Ecuador. Recuperado de <https://dspace.ups.edu.ec/bitstream/123456789/2343/1/Tesis.pdf>
- FAO y OPS. (2017). *2016. América Latina y el Caribe. Panorama de la seguridad alimentaria y nutricional. Sistemas alimentarios sostenibles para poner fin al hambre y la malnutrición*. Santiago, Chile. Recuperado de <http://www.fao.org/3/a-i6747s.pdf>
- FAO. (2017). Seminario Internacional sobre Sequía y Agricultura. Roma, Italia. Recuperado de <http://www.fao.org/3/a-bs902s.pdf>
- Giddins, L., y Soto, M. (2006). Teleconexiones y precipitación en América del Sur. *Revista de climatología*, 6, 13-20. Recuperado de <https://core.ac.uk/download/pdf/26226405.pdf>
- Gobernación de Boyacá. (2012). *Hidrografía boyacense*. Boyacá, Colombia. Recuperado de <https://www.boyaca.gov.co/hidrografia-boyacense/>
- GWP Centroamérica. (2016). Análisis socioeconómico del impacto sectorial de la sequía de 2014 en Centroamérica. Recuperado de https://www.gwp.org/globalassets/global/gwp-cam_files/impacto-sequia-2014_fin.pdf
- Hayes, M. J., Svoboda, M. D., & Wilhite, D. A. (2000). Monitoring drought using the standardized precipitation index. En D. A. Wilhite. (Ed.) *Drought: A Global Assessment* (pp. 168-180). Londres, Reino Unido: Routledge. Recuperado de <https://digitalcommons.unl.edu/cgi/viewcontent.cgi?article=1069&context=droughtfacpub>
- Hidalgo, M. (2017). Variabilidad climática interanual sobre el Ecuador asociada a ENOS. *CienciAmérica*, 6(2), 42-47. Recuperado de <http://201.159.222.118/openjournal/index.php/uti/article/download/82/68>
- Hurrell, J. (1995). Decadal trends in the North Atlantic Oscillation: regional temperatures and precipitation. *Science*, 269(5224), 676-679. Recuperado de <http://one.geol.umd.edu/dv/readings/hurrell95.pdf>
- IMN. (s.f). Clima en Costa Rica. El clima y las regiones climáticas de Costa Rica. Recuperado de <https://www.imn.ac.cr/documents/10179/31165/clima-regiones-climat.pdf/cb3b55c3-f358-495a-b66c-90e677e35f57>
- IPCC. (2013). *Cambio Climático 2013. Bases físicas. Contribución del Grupo de trabajo I al Quinto Informe de Evaluación del Grupo Intergubernamental*

de Expertos sobre el Cambio Climático. Cambridge University Press, Cambridge, Reino Unido y Nueva York, Estados Unidos de América. Recuperado de https://www.ipcc.ch/site/assets/uploads/2018/03/WG1AR5_SummaryVolume_FINAL_SPANISH.pdf

IIAP. (2013). *Informe Final. Plan Estratégico de la Macrocuena del Pacífico*. Quibdó, Chocó, Colombia. Recuperado de http://www.minambiente.gov.co/images/GestionIntegraldelRecursoHidrico/pdf/macrocuenas/macrocuena_pacifico/1_y_2_Capitulos_Linea_Base_y_Diagnostico_Jun.2013.pdf

Kallis, G. (2008). Droughts. *Annual review of environment and resources*, 33, 85-118. Recuperado de <https://www.annualreviews.org/doi/pdf/10.1146/annurev.enviro.33.081307.123117>

Kayano, M., y Capistrano, V. (2014). How the Atlantic multidecadal oscillation (AMO) modifies the ENSO influence on the South American rainfall. *International Journal of Climatology*, 34(1), 162-178. Recuperado de <https://rmets.onlinelibrary.wiley.com/doi/epdf/10.1002/joc.3674>

Luna-Romero, A., Ramírez, I., Sánchez, C., Conde, J., Agurto, L., y Villaseñor, D. (2018). Distribución espacio-temporal de la precipitación en la cuenca del río Jubones, Ecuador: 1975-2013. *Scientia Agropecuaria*, 9(1), 63-70. Recuperado de <http://www.scielo.org.pe/pdf/agro/v9n1/a07v9n1.pdf>

Loaiza, W., Carvajal, Y. y Barquero, O. (2015). Índice estandarizado de precipitación (SPI) para la caracterización de sequías meteorológicas en la cuenca del río Dagua-Colombia. *Estudios Geográficos*. 76 (279). 557-578. Recuperado de <https://dialnet.unirioja.es/servlet/articulo?codigo=5391864>

Mazzarella, A., Giuliacci, A., & Liritzis, I. (2010). On the 60-month cycle of multivariate ENSO index. *Theoretical and applied climatology*, 100(1-2), 23-27. Recuperado de <https://link.springer.com/article/10.1007/s00704-009-0159-0>

Mantua, N., y Hare, S. (2002). The Pacific decadal oscillation. *Journal of oceanography*, 58(1), 35-44. Recuperado de <https://link.springer.com/content/pdf/10.1023/A:1015820616384.pdf>

- McKee, T., Doesken, N., y Kleist, J. (1993). The relationship of drought frequency and duration to time scales. *Proceedings of the 8th Conference on Applied Climatology*, 22 (17). 179-183. Recuperado de https://www.droughtmanagement.info/literature/AMS_Relationship_Drought_Frequency_Duration_Time_Scales_1993.pdf
- Medina, R., y Ñique, C. (2017). Bosques aleatorios como extensión de los árboles de clasificación con los programas R y Python. *Interfases*, (10), 165-189. Recuperado de <https://revistas.ulima.edu.pe/index.php/Interfases/article/view/1775/1828>
- Mishra, A., y Singh, V. (2010). A review of drought concepts. *Journal of hydrology*, 391(1), 202-216. Recuperado de [https://www.researchgate.net/profile/Ashok_Mishra11/publication/318726368_A_Review_of_Drought_Concepts_- /data/597a460d4585151e3586564d/A-Review-of-Drought-Concepts.pdf](https://www.researchgate.net/profile/Ashok_Mishra11/publication/318726368_A_Review_of_Drought_Concepts_/data/597a460d4585151e3586564d/A-Review-of-Drought-Concepts.pdf)
- Montealegre J., (2014). *Actualización del componente Meteorológico del modelo institucional del IDEAM sobre el efecto climático de los fenómenos El Niño y La Niña en Colombia, como insumo para el Atlas Climatológico. Informe de contrato de prestación de servicios profesionales*. Instituto de Hidrología, Meteorología y Estudios Ambientales–IDEAM. Bogotá D.C. Recuperado de <http://www.ideam.gov.co/documents/21021/440517/Actualizacion+Modelo+Institucional+El+Ni%C3%B1o+-+La+Ni%C3%B1a.pdf/02f5e53b-0349-41f1-87e0-5513286d1d1d>
- Muñoz, R., Giraldo, J., Brenes, A., Avendaño, I., Nauditt, A., Hidalgo, H., y Birkel, C. (2018). Spatial and temporal patterns, trends and teleconnection of cumulative rainfall deficits across Central America. *International Journal of Climatology*, 39(4), 1940-1953. Recuperado de https://rmets.onlinelibrary.wiley.com/doi/pdf/10.1002/joc.5925?casa_token=afjjxGSh4QAAAAA:-cRlskhnIvaUeOGyTH8MBNmvEqohrPJLWgXzd5Sf8PyztZTqZ_kO9CbV9sxPo9QjrrprYV4-TMyjY_3x
- Nigam, S., y Baxter, S. (2015). Teleconnections. En G. R. North, J., Pyle & F. Zhang (Eds). *Encyclopedia of Atmospheric Sciences*, 2nd edition, Vol 3, (pp. 90–109). Elsevier Ltd. Recuperado de <http://www.atmos.umd.edu/~nigam/Nigam-Baxter.Teleconnections.printed.9October2014.lowres.pdf>

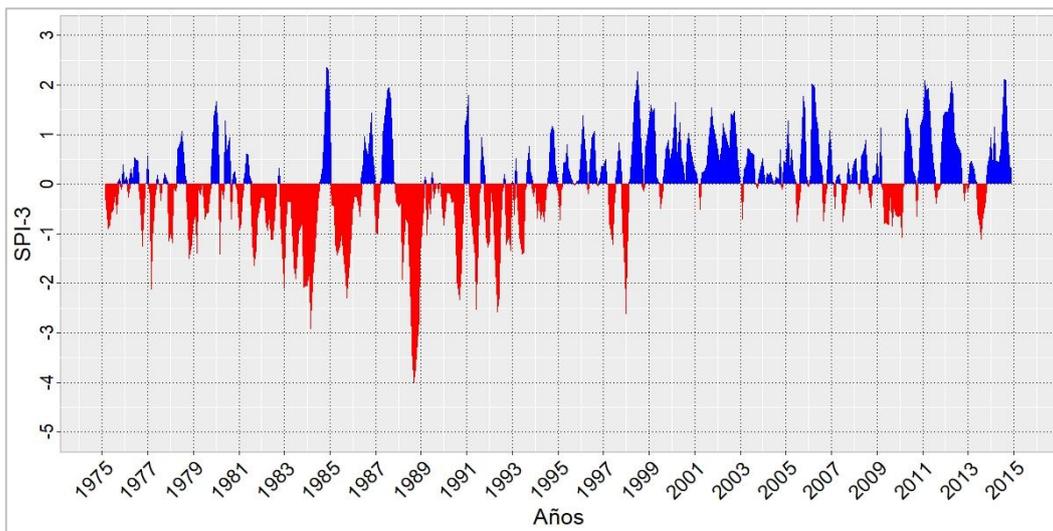
- NOAA. (2005). *Frequently Asked Questions About the Atlantic Multidecadal Oscillation (AMO)*. Recuperado de https://www.aoml.noaa.gov/phod/amo_faq.php#faq_1
- Null, J. (2019). El Niño and La Niña years and intensities: Based on Oceanic Niño Index. Recuperado de <https://ggweather.com/enso/oni.htm>
- Ochoa, A., Pineda, L., Crespo, P., y Willems, P. (2014). Evaluation of TRMM 3B42 precipitation estimates and WRF retrospective precipitation simulation over the Pacific–Andean region of Ecuador and Peru. *Hydrology and Earth System Sciences*, 18(8), 3179-3193. Recuperado de <https://www.hydrol-earth-syst-sci.net/18/3179/2014/hess-18-3179-2014.pdf>
- OMM. (2018). *Guía de Prácticas Climatológicas*. Ginebra, Suiza. Recuperado de https://library.wmo.int/pmb_ged/wmo_100_es.pdf
- OMM. (2012). *Índice normalizado de precipitación. Guía del usuario*. Ginebra, Suiza. Recuperado de http://www.droughtmanagement.info/literature/WMO_standardized_precipitation_index_user_guide_es_2012.pdf
- OMM y Asociación Mundial para el Agua. (2016). *Manual de indicadores e índices de sequía*. Ginebra, Suiza. Recuperado de https://library.wmo.int/doc_num.php?explnum_id=10027
- Ortega, D. (2013). Sequía: causas y efectos de un fenómeno global. *Ciencia UANL*, 61. 8-15. Recuperado de <http://eprints.uanl.mx/9148/1/Ciencia%20UANL%2016-61.pdf>
- Pacheco, J., Parra, N., y Avilés, A. (2017). EJE 02-01 Análisis de la sequía en la cuenca del Paute mediante el índice de precipitación estandarizado (SPI). *Memorias Universidad Del Azuay*, 1(16), 41 - 49. Recuperado de <http://revistas.uazuay.edu.ec/index.php/memorias/article/view/47>
- Poleo, D. (2016). ¿Cambio climático o variabilidad climática? Historia, ciencia y política en el clima mesoamericano. *Revista de Ciencias Ambientales*, 50(1), 24-39. Recuperado de <https://dialnet.unirioja.es/descarga/articulo/5644437.pdf>
- Ponvert-Delisle, 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. Recuperado de <http://scielo.sld.cu/pdf/ctr/v37n3/ctr03316.pdf>

- Ravelo, A., Planchuelo, A., Aroche, R., Douriet, J., Hallack, M., Jiménez, R., Maureira, H., Tiscornia, G., Zambettor, R. y Zimmermann, R. (2016). Monitoreo y Evaluación de las Sequías en América Central. Estudio de Caso: Corredor Seco de El Salvador, Honduras y Nicaragua. *Joint Research Centre, Luxembourg: Publications Office of the European Union*. Recuperado de <http://publications.jrc.ec.europa.eu/repository/bitstream/JRC102117/lbna27974esn.pdf>
- Rodríguez, M., y Mora, R. (2001). Estadística informática: casos y ejemplos con el SPSS. Alicante: Universidad de Alicante. Recuperado de <https://rua.ua.es/dspace/bitstream/10045/8143/1/Regresion%20MUTIPLE.pdf>
- Suryabhadgavan, K. (2017). GIS-based climate variability and drought characterization in Ethiopia over three decades. *Weather and climate extremes*, 15, 11-23. Recuperado de <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S2095633916301393>
- Sánchez, I., y Barquero-Bernal, A. (2011). Estimación de la representatividad del modelo de descarga hidrológica (MPI Hydrological Model) en la cuenca vertiente del Pacífico colombiano. *Revista Colombiana de Física*, 43(2). 295-300. Recuperado de <http://revcolfis.org/ojs/index.php/rcf/article/download/430220/203>
- Timmermann, A., Okumura, Y., An, S. I., Clement, A., Dong, B., Guilyardi, E. y Stouffer, R. J. (2007). The influence of a weakening of the Atlantic meridional overturning circulation on ENSO. *Journal of climate*, 20 (19), 4899-4919. Recuperado de <https://journals.ametsoc.org/jcli/article/20/19/4899/30462>
- Trenberth, K., y National Center for Atmospheric Research Staff (2019). *The Climate Data Guide: Nino SST Indices (Nino 1+2, 3, 3.4, 4; ONI and TNI)*. Boulder, Colorado: The Climate Data Guide. Recuperado de <https://climatedataguide.ucar.edu/climate-data/nino-sst-indices-nino-12-3-34-4-oni-and-tni>.
- Trenberth, K., y Stepaniak, D. (2001). Indices of El Niño Evolution. *Journal of Climate*, 14(8), 1697-1701. Recuperado de <https://journals.ametsoc.org/jcli/article/14/8/1697/29571/Indices-of-El-Nino-Evolution>

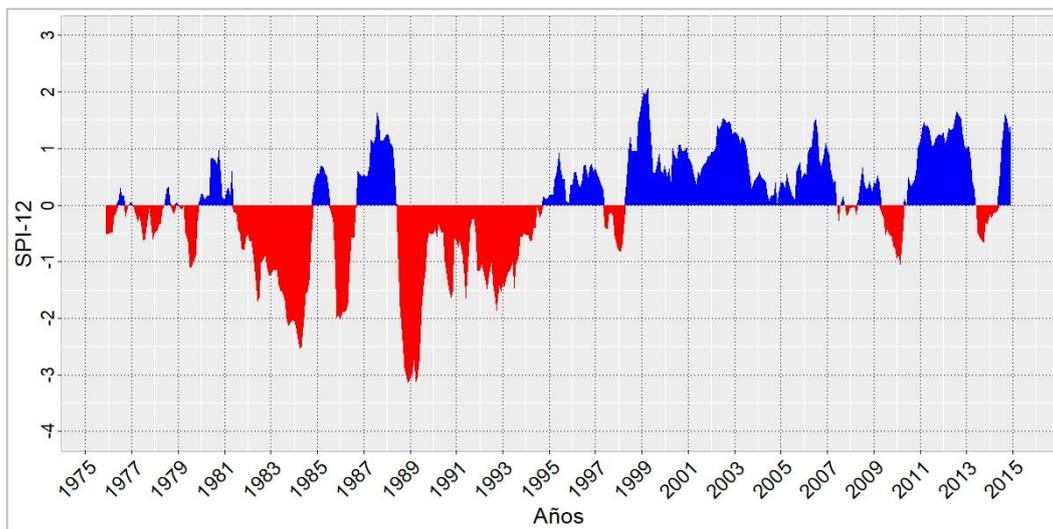
- Urgilés, M. (2015). *Análisis espacio-temporal de precipitaciones e intensidades: obtención de histogramas de diseño en la cuenca alta del río Paute* (Tesis de grado). Universidad de Cuenca. Retrieved from <http://dspace.ucuenca.edu.ec/bitstream/123456789/23108/1/tesis.pdf>
- Valiente, Ó. (2001). Sequía: definiciones, tipologías y métodos de cuantificación. *Investigaciones Geográficas (Esp)*, (26). 59-80. Recuperado de <http://rua.ua.es/dspace/handle/10045/363>
- Velasco, I., Ochoa, L., y Gutiérrez, C. (2005). Sequía, un problema de perspectiva y gestión. *Región y sociedad*, 17 (34), 35-71. Recuperado de <http://www.scielo.org.mx/pdf/regsoc/v17n34/v17n34a2.pdf>
- Veroy, C., Valerio, R., Crespo, C. y Aguilar, G. (2014). Análisis de la sequía en la subcuenca del río Bonito mediante el índice de precipitación estandarizado. *Revista Ciencia y Tecnología*. (14). 25-41. Recuperado de <https://lamjol.info/index.php/RCT/article/view/1794/1599>
- Vuille, M., Bradley, R., y Keimig, F. (2000). Climate variability in the Andes of Ecuador and its relation to tropical Pacific and Atlantic sea surface temperature anomalies. *Journal of Climate*, 13(14), 2520-2535. Recuperado de [https://journals.ametsoc.org/doi/pdf/10.1175/1520-0442\(2000\)013%3C2520%3ACVITAO%3E2.0.CO%3B2](https://journals.ametsoc.org/doi/pdf/10.1175/1520-0442(2000)013%3C2520%3ACVITAO%3E2.0.CO%3B2)
- Wang, S., Huang, J., He, Y., y Guan, Y. (2014). Combined effects of the Pacific decadal oscillation and El Niño-southern oscillation on global land dry-wet changes. *Scientific reports*, 4, 6651. Recuperado de <https://www.nature.com/articles/srep06651.pdf>
- Wilhite, D., y Glantz, M. (1985). Understanding: the drought phenomenon: the role of definitions. *Water international*, 10(3), 111-120. Recuperado de <https://digitalcommons.unl.edu/cgi/viewcontent.cgi?referer=https://scholar.google.es/&httpsredir=1&article=1019&context=droughtfacpub>
- Wilhite, D., Svoboda, M., y Hayes, M. (2007). Understanding the complex impacts of drought: A key to enhancing drought mitigation and preparedness. *Water resources management*, 21(5), 763-774. Recuperado de <https://digitalcommons.unl.edu/cgi/viewcontent.cgi?referer=https://www.google.com/&httpsredir=1&article=1042&context=droughtfacpub>

Zhang, Y., Wallace, J. M., y Battisti, D. S. (1997). ENSO-like interdecadal variability: 1900–93. *Journal of climate*, 10(5), 1004-1020. Recuperado de <http://citeseerx.ist.psu.edu/viewdoc/download?doi=10.1.1.591.5857&rep=rep1&type=pdf>

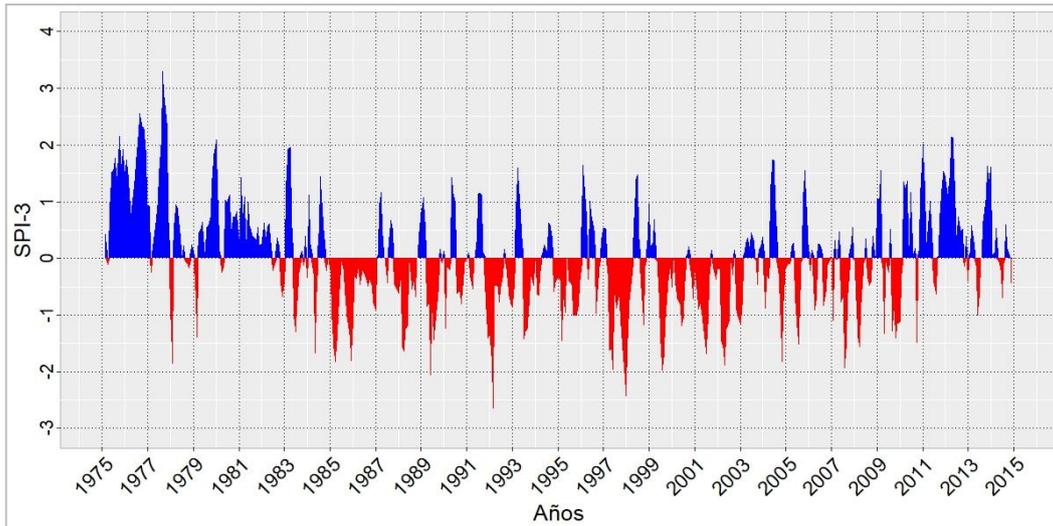
Anexos



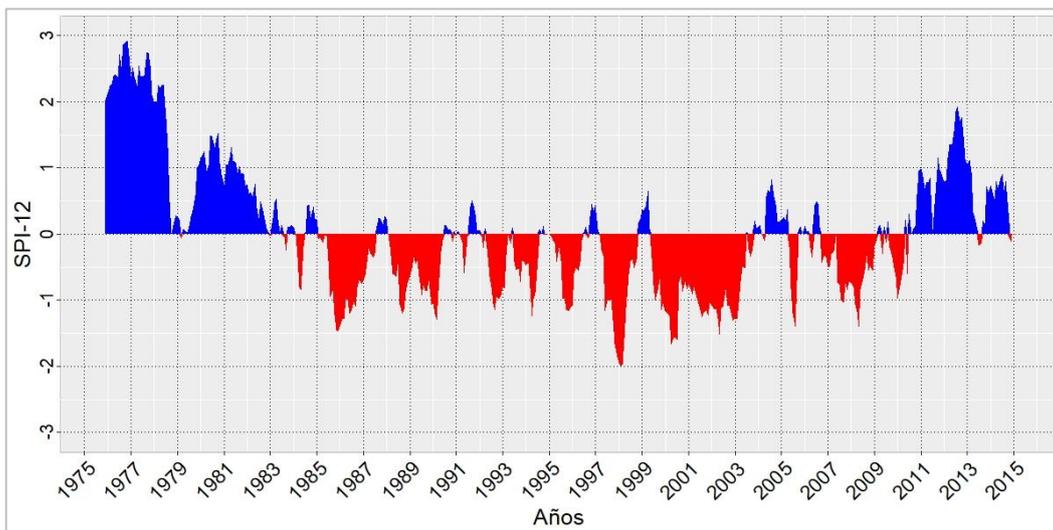
Anexo 1. Índice estandarizado de precipitación a escala temporal de 3 meses de la estación Zetaquirá, cuenca Lengupá, Colombia.



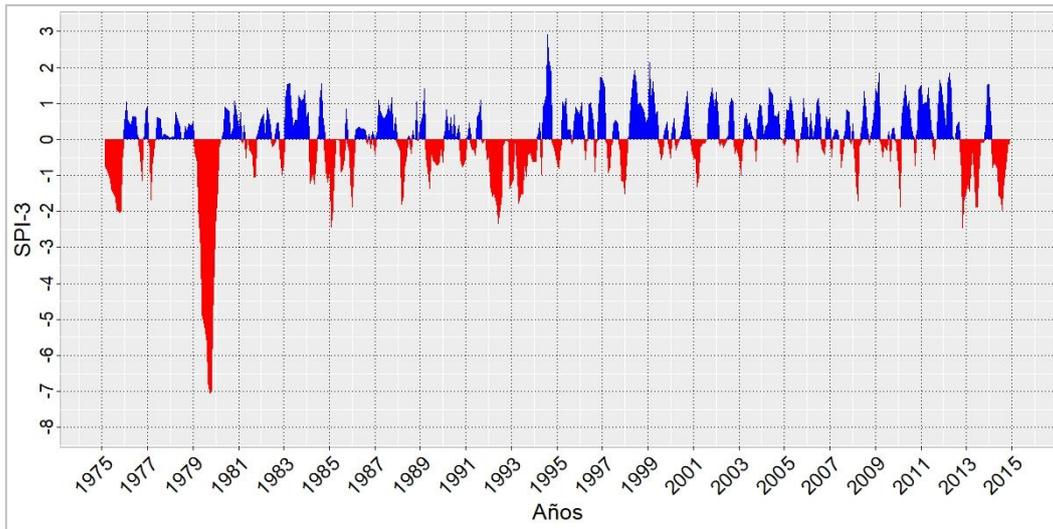
Anexo 2. Índice estandarizado de precipitación a escala temporal de 12 meses de la estación Zetaquirá, cuenca Lengupá, Colombia.



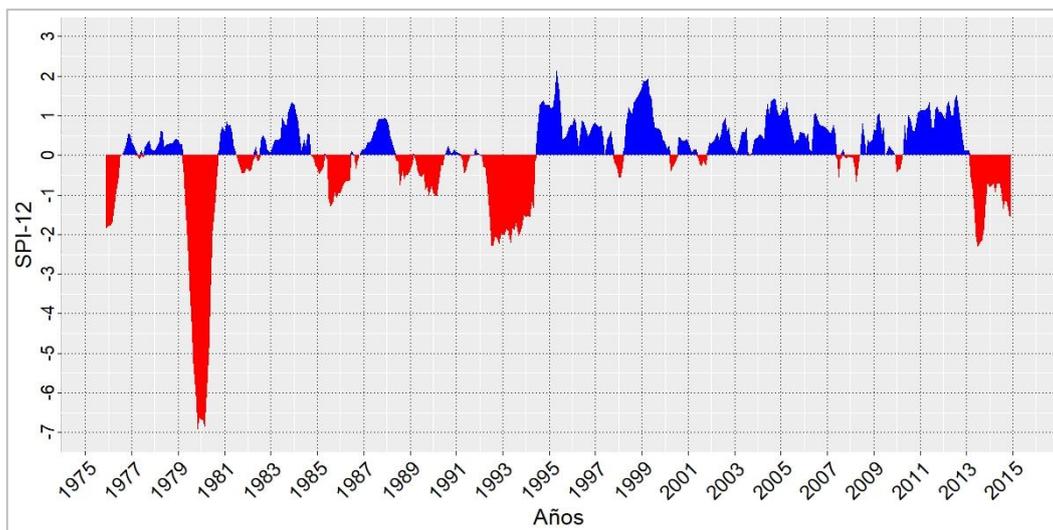
Anexo 3. Índice estandarizado de precipitación a escala temporal de 3 meses de la estación Campo Buenavista, cuenca Lengupá, Colombia.



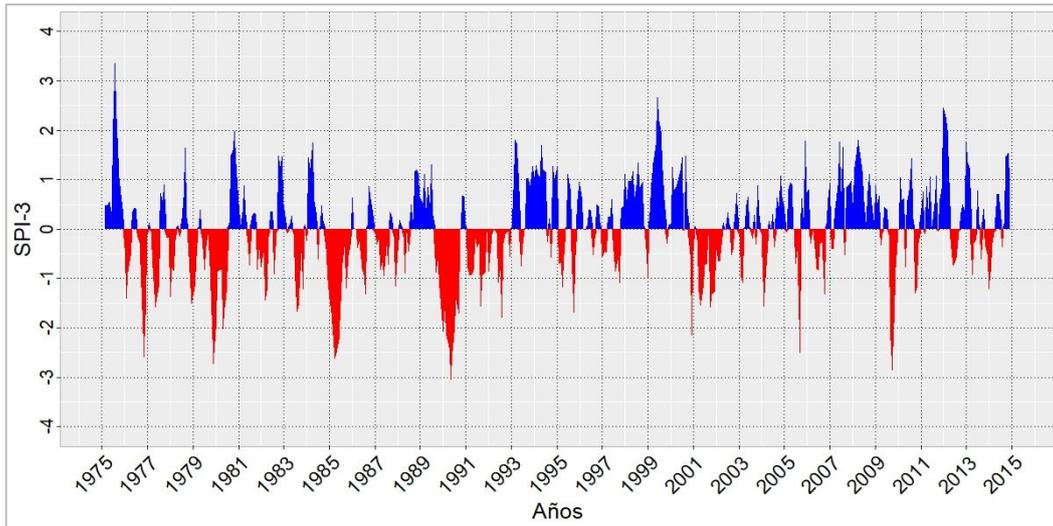
Anexo 4. Índice estandarizado de precipitación a escala temporal de 12 meses de la estación Campo Buenavista, cuenca Lengupá, Colombia.



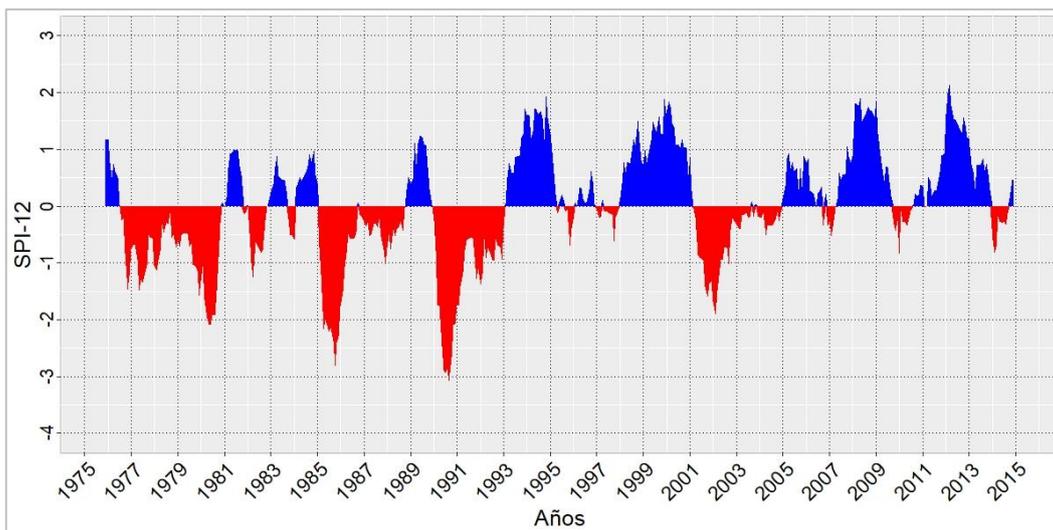
Anexo 5. Índice estandarizado de precipitación a escala temporal de 3 meses de la estación Páez, cuenca Lengupá, Colombia.



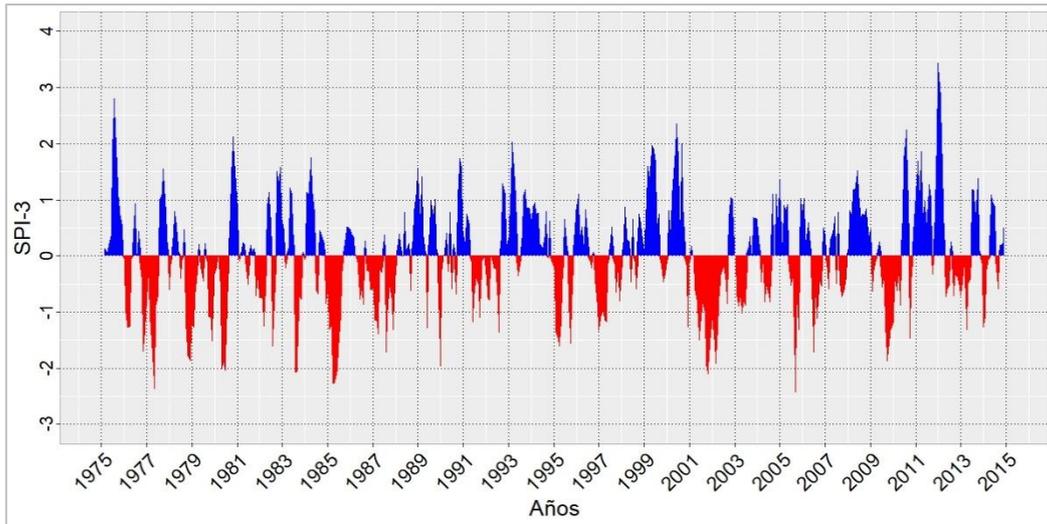
Anexo 6. Índice estandarizado de precipitación a escala temporal de 3 meses de la estación Páez, cuenca Lengupá, Colombia.



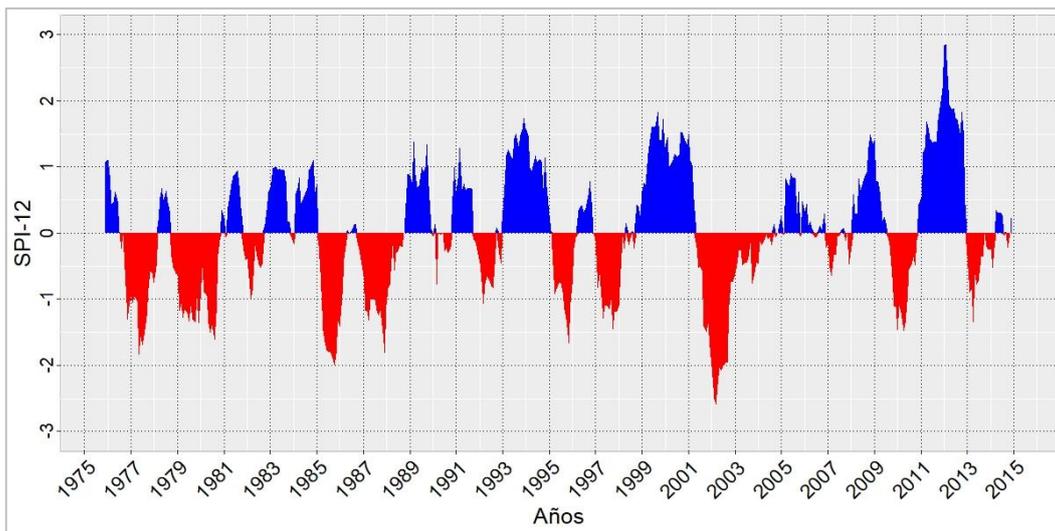
Anexo 7. Índice estandarizado de precipitación a escala temporal de 3 meses de la estación Sayausi, cuenca Paute, Ecuador.



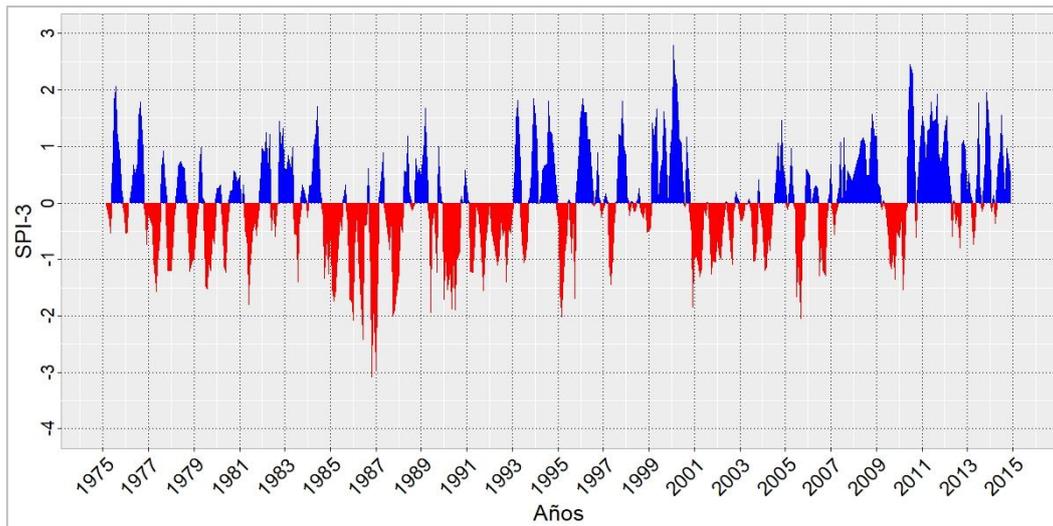
Anexo 8. Índice estandarizado de precipitación a escala temporal de 12 meses de la estación Sayausi, cuenca Paute, Ecuador.



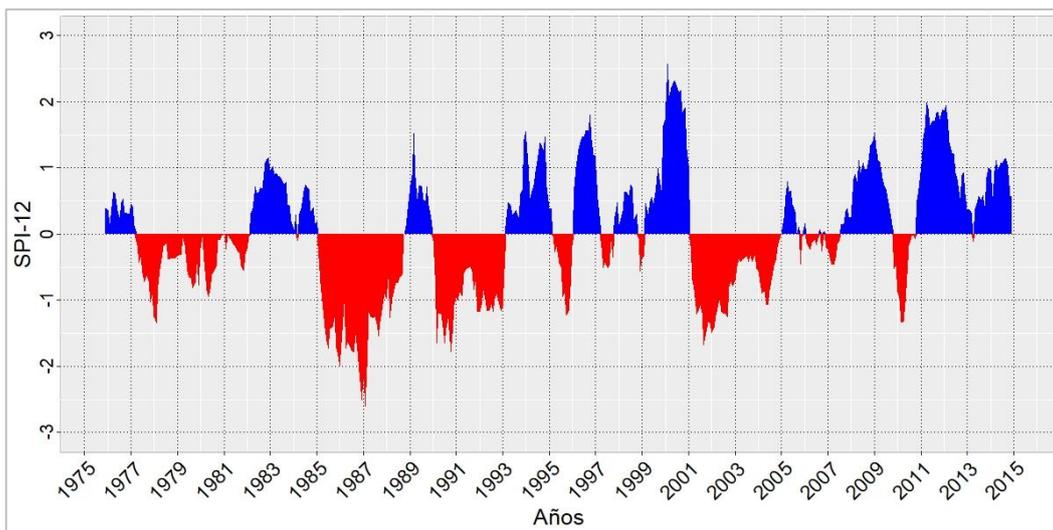
Anexo 9. Índice estandarizado de precipitación a escala temporal de 3 meses de la estación Ricaurte Cuenca, cuenca Paute, Ecuador.



Anexo 10. Índice estandarizado de precipitación a escala temporal de 12 meses de la estación Ricaurte Cuenca, cuenca Paute, Ecuador.



Anexo 11. Índice estandarizado de precipitación a escala temporal de 3 meses de la estación Paute, cuenca Paute, Ecuador.



Anexo 12. Índice estandarizado de precipitación a escala temporal de 12 meses de la estación Paute, cuenca Paute, Ecuador.